

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Přímé řízení momentu synchronního motoru
s permanentními magnety
Direct Torque Control of Permanent Magnet
Synchronous Motor

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. David Blažek

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T003 Aplikovaná elektronika

Téma:

Přímé řízení momentu synchronního motoru s permanentními magnety
Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte teoretický rozbor metod přímého řízení momentu synchronního motoru s permanentními magnety.
2. Do řídicí jednotky s DSC TMS320F28335 implementujte vybranou metodu přímého řízení momentu synchronního motoru s permanentními magnety.
3. V programu LabView vytvořte uživatelské prostředí pro komunikaci s řídicím systémem s možností sledování a modifikace důležitých parametrů a veličin realizované metody přímého řízení momentu.
4. Ověřte správnou činnost realizovaného algoritmu měřením nejdůležitějších veličin pohonu.

Seznam doporučené odborné literatury:

Brandštetter, Pavel. Elektrické regulovatelné pohony III., Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2012.

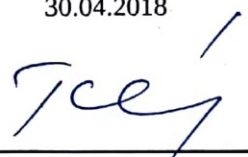
Firemní literatura Texas Instruments pro DSC TMS320F28335.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Kuchař, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 27.4.2018


Podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Kuchařovi, Ph.D., a dále Ing. Petru Chamrádovi za věnovaný čas a poskytnutí cenných rad při zpracování diplomové práce.

Také bych rád poděkoval svým rodičům za podporu během celého studia.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na popis a problematiku jedné z metod přímého řízení momentu synchronního motoru s permanentními magnety. V rámci praktické části je proveden návrh a implementace algoritmu této metody do řídicího systému s digitálním signálovým procesorem TMS320F28335 a vytvoření uživatelského rozhraní pro snadné ovládání a nastavení veličin. Práce se také zabývá detailnějším popisem programů Code Composer Studio a LabVIEW, které byly použity pro její realizaci. Výsledky práce jsou ověřeny měřením na synchronním motoru v laboratorní učebně na VŠB-TUO.

Klíčová slova

CCStudio, DTC, LabVIEW, Přímé řízení momentu, Synchronní motor s permanentními magnety, TMS320F28335.

Abstract

This Master's thesis is focused on the description and problems of one of the methods of direct torque control of permanent magnet synchronous motor. The practical part includes the design and implementation of an algorithm based on this method into a digital signal processor control system TMS320F28335 and creation of a user interface for easy control and setting of variables. The thesis also deals with a more detailed description of programs, Code Composer Studio and LabVIEW, which were used for this realization. The results of the project are verified by measuring on a synchronous motor in a lab at VSB-TUO.

Key Words

CCStudio, DTC, LabVIEW, Direct Torque Control, Permanent Magnet Synchronous Motor, TMS320F28335.

Obsah

Obsah.....	6
Seznam použitých symbolů.....	8
Seznam použitých zkratk.....	9
Seznam obrázků.....	11
Seznam tabulek.....	12
1. Úvod.....	13
2. Synchronní motor s permanentními magnety.....	14
2.1 Způsoby řízení SM.....	15
2.1.1 Skalární řízení.....	15
2.1.2 Vektorové řízení.....	15
3. Přímé řízení momentu synchronního motoru s permanentními magnety.....	16
3.1 Popis blokové struktury.....	17
3.1.1 BT3/2.....	17
3.1.2 BVR.....	17
3.1.3 BSFC.....	18
3.1.4 BTPC.....	18
3.1.5 BT2/3.....	19
3.1.6 BSD.....	19
3.1.7 BHM a BHQ.....	19
3.1.8 BSPS.....	20
3.1.9 TFC.....	20
3.2 Reverzace.....	21
3.3 ST-DTC.....	22
4. Implementace algoritmu PMSM-DTC do řídicího systému.....	24
4.1 Řídicí systém s TMS320F28335.....	24
4.1.1 TMS320F28335.....	25
4.2 Popis zdrojového programu.....	25
4.2.1 Spuštění programu.....	25
4.2.2 Hlavní struktura programu.....	28
5. Laboratorní stanoviště.....	30
5.1 Měnič.....	30
5.2 Motorové soustrojí.....	31

6. LabVIEW	33
6.1 Spuštění programu	33
6.1.1 Ovládací panel	34
6.1.2 Měřicí přístroj	36
6.1.3 Blokový diagram	36
7. Ověření metody	38
7.1 Veličiny v ustáleném stavu	38
7.2 Veličiny při rozběhu	42
8. Závěr	44
Literatura	45
Seznam příloh	46

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
b		Nejvyšší hodnota převáděného slova A/D převodníku
e_{ψ}	Wb	Odchylka statorového magnetického toku
$f_{SYSCLCOUT}$	MHz	Frekvence jádra procesoru
f_{vz}	kHz	Vzorkovací frekvence
i_{1a}, i_{1b}, I_S	A	Okamžité hodnoty fázových proudů
$i_{1\alpha}, i_{1\beta}$	A	Složky vektoru statorového proudu
k_m		Konstanta motoru
k_u, k_I		Převodní konstanty
m^*, M_{ec}	Nm	Žádaná hodnota momentu
m, M_e	Nm	Moment stroje
n_n	Ot·min ⁻¹	Jmenovité otáčky
P_n	W	Jmenovitý výkon
p_p		Počet pólů motoru
q	VA _r	Jalový výkon
q^*	VA _r	Žádaná hodnota jalového výkonu
R_{MU}, R_{MI}	Ω	Měřicí odpory pro napěťové a proudové čidlo
R_p	Ω	Předřadný odpor
R_s	Ω	Statorový odpor
S_q, S_m, d_M, d_{ψ}		Výstupní signál z hysterezních regulátorů
u_0-u_7	V	Napěťové vektory realizované střídačem
$u_{1\alpha}, u_{1\beta}$	V	Složky vektoru statorového napětí
u_d	V	Napětí v meziobvodu
X_{max}	V	Rozsah měřeného napětí analogového vstupu
$\Delta m, eM$	Nm	Odchylka momentu motoru
Δq	VA _r	Odchylka jalového výkonu
$\Psi_{1a}, \Psi_{1b}, \Psi_{1c}$	Wb	Okamžité hodnoty fázových statorových toků
$\Psi_{1\alpha}, \Psi_{1\beta}$	Wb	Složky vektoru statorového magnetického toku
γ	rad	Úhel mezi OSS a SSS
ω_m	rad·s ⁻¹	Mechanická úhlová rychlost

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
BHM	Dvoupolohový hysterezní regulátor momentu
BHQ	Dvoupolohový hysterezní regulátor jalového výkonu
BSD	Blok vyhodnocení sektoru
BSFC	Blok výpočtu statorového toku
BSP	Blok tvorby pulzů
BSPS	Blok výběru spínací frekvence
BT2/3	Blok transformace 2/3
BT3/2	Blok transformace 3/2
BTPC	Blok výpočtu jalového výkonu a momentu
BVR	Blok rekonstrukce napětí
CCS	Code Composer Studio
COM	Komunikační port
DSP	Digitální signálový procesor
DTC	Přímé řízení momentu
DTC-PMSM	Přímé řízení momentu synchronního motoru s permanentními magnety
HW	Hardware
IDE	Integrated Development Environment
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
JTAG	Ladicí rozhraní procesoru
LabVIEW	Grafické vývojové prostředí
Nd-Fe-B	Neodymové magnety
PC	Osobní počítač
PMSM	Synchronní motor s permanentními magnety
PWM	Pulzně šířková modulace
RAM	Paměť s libovolným přístupem
ROM	Paměť pouze pro čtení
ŘS	Řídicí systém
Sa-Co	Samariové magnety
SM	Synchronní motor
ST-DTC	Přímé řízení momentu s využitím výběrové tabulky
SubVI	Podprogram v LabVIEW
SW	Software

TBCTR	Registr čítače časové základny
TBPRD	Registr periódy časové základny
TFC	Nepřímý měnič kmitočtu
USB	Univerzální sériové rozhraní
VI	Výstupní soubor z programu LabVIEW
VISA	Softwarový standard pro komunikaci

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Konstrukce PMSM.....	14
Obr. 3.1 Blokové schéma synchronního motoru s přímým řízením momentu.	16
Obr. 3.2 Vnitřní schéma bloku BSFC.	18
Obr. 3.3 Zjednodušené schéma nepřímého měniče kmitočtu s napět'ovým meziobvodem.	21
Obr. 3.4 Blokové schéma ST-DTC.	23
Obr. 4.1 Řídicí systém s DSP TMS320F28335.....	24
Obr. 4.2 Code Composer Studio 7.3.0.	26
Obr. 4.3 Code Composer Studio 7.3.0. CCS Debug.	27
Obr. 4.4 Vývojové diagramy programu.	28
Obr. 5.1 Laboratorní stanoviště.....	30
Obr. 6.1 Čelní panel.	34
Obr. 6.2 Nastavení seznamu.....	35
Obr. 6.3 Načtení dat ze souboru.	37
Obr. 7.1 Veličiny motoru v ustáleném stavu ($m^* = 5 \text{ Nm}$, $q^* = 0 \text{ VAr}$, $f_{vZ} = 10 \text{ kHz}$).	39
Obr. 7.2 Veličiny motoru v ustáleném stavu ($m^* = 5 \text{ Nm}$, $q^* = 0 \text{ VAr}$, $f_{vZ} = 25 \text{ kHz}$).	39
Obr. 7.3 Veličiny motoru v ustáleném stavu ($HM = 0 \text{ Nm}$, $HQ = 0 \text{ VAr}$, $f_{vZ} = 25 \text{ kHz}$).	40
Obr. 7.4 Veličiny motoru v ustáleném stavu ($HM = 0,3 \text{ Nm}$, $HQ = 0,3 \text{ VAr}$, $f_{vZ} = 25 \text{ kHz}$).	40
Obr. 7.5 Veličiny motoru v ustáleném stavu ($HM = 0,3 \text{ Nm}$, $HQ = 0,3 \text{ VAr}$, $f_{vZ} = 10 \text{ kHz}$).	41
Obr. 7.6 Trajektorie koncového bodu statorového magnetického toku v ustáleném stavu ($f_{vZ} = 25$ kHz)	41
Obr. 7.7 Veličiny motoru při rozběhu v kladném směru ($m^* = 3 \text{ Nm}$, $f_{vZ} = 25 \text{ kHz}$).	42
Obr. 7.7 Veličiny motoru při rozběhu v záporném směru ($m^* = -3 \text{ Nm}$, $f_{vZ} = 25 \text{ kHz}$).	43

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Složky statorového napětí pro jednotlivé vektory napětí	17
Tab. 3.2 Vyhodnocení sektoru polohy vektoru magnetického toku.....	19
Tab. 3.3 Spínací tabulka pro kladný a záporný směr otáčení.....	20
Tab. 3.4 Určení fázových napětí pro jednotlivé spínací kombinace.	21
Tab. 3.5 Spínací tabulka pro kladný a záporný směr otáčení.....	22
Tab. 3.6 Spínací tabulka ST-DTC.....	23
Tab. 4.1 Nastavení registru TBPRD.....	29
Tab. 5.1 Štítkové parametry asynchronního motoru	31
Tab. 5.2 Parametry PMSM 1FK7063-5AF7	32

1. ÚVOD

Se stále zvyšujícími nároky na dynamické a ekonomické vlastnosti elektrických pohonů došlo v několika posledních letech k velkému rozvoji řízení těchto pohonů pomocí mikropočítačové techniky. Mezi nejmodernější metody řízení patří zejména přímé řízení momentu a zatím nejčastěji používané vektorové řízení.

Při vektorovém řízení synchronního motoru je nutné znát aktuální polohu rotoru, která se získává nejčastěji ze snímače polohy. To má za následek řadu komplikací, které vedou k vyšším nákladům a složitější instalaci. Musí se dále řešit mechanická odolnost, odolnost proti kapalině a prachu. Použití snímače polohy tedy vede k celkově nižší spolehlivosti. Proto se stále více dbá na vývoj bezsenzorového řízení.

U metody přímého řízení momentu je zapotřebí výkonný signálový mikroprocesor. Dosahuje se zde vynikajících výsledků pro dynamicky náročné aplikace, ovšem problém nastává při reverzaci a při řízení v nízkých otáčkách.

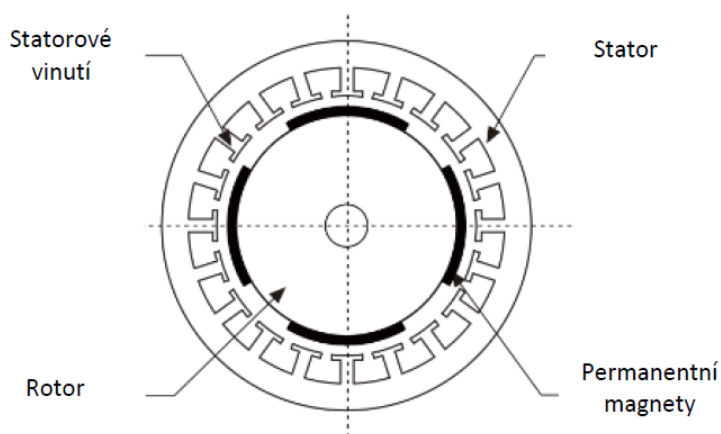
Tato diplomová práce je zaměřena na moderní způsob přímého řízení synchronního motoru s permanentními magnety.

Úvodní část popisuje základní princip a popis regulační struktury přímého řízení momentu a jalového výkonu. Dále je popsán řídicí systém s digitálním signálovým procesorem TMS320F28335 a implementace vybrané metody do tohoto systému. Součástí této kapitoly je také popis vytvořeného algoritmu v programu Code Composer Studio. Následující kapitola se zabývá popisem laboratorního stanoviště a parametry použitého motoru. Šestá kapitola je zaměřena na uživatelské rozhraní, které bylo vytvořeno v programu LabVIEW pro snadné zadávání a měření veličin. Závěrem práce je ověření metody přímého řízení pomocí naměřených průběhů a zhodnocení výsledků.

2. SYNCHRONNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY

Synchronní motory mají v zásadě stejnou konstrukci statoru jako u asynchronního motoru. Stator je opatřen střídavým, trojfázovým vinutím a elektrotechnickými plechy staženými do svazku. Přivede-li se do statorového vinutí trojfázový proud, vznikne točivé magnetické pole, které je schopno s sebou unášet magnetové kolo buzeného rotoru. Takto působí synchronní motor, který se po roztočení otáčí současně s točivým magnetickým polem přesně synchronními otáčkami, které se nezmění ani při zatížení. Při zvýšeném zatížení vzroste vzdálenost mezi póly rotoru a póly s točivým polem. Rotor se pak otáčí s jistým úhlem zatížení. Po překročení určité meze motor vypadává ze synchronismu a dochází k jeho zastavení, přičemž pak odebírá velký proud nakrátko (poruchový stav) [2].

V současné době se používá jako zdroj magnetomotorického napětí permanentní magnet místo budícího vinutí jak u stejnosměrných, tak střídavých synchronních motorů. Nejlepší výsledky se dosahují použitím permanentních magnetů ze vzácných zemin jako SaCo nebo NdFeB [1].



Obr. 2.1 Konstrukce PMSM.

PMSM mají právě oproti stejnosměrným motorům i motorům s budícím vinutím několik výhodnějších vlastností a to především menší hmotnost, objem, moment setrvačnosti, velkou momentovou přetížitelnost, vyšší účinnost a odpadá problém s přívodem proudu do buzení rotoru. Má samozřejmě i své nevýhody, mezi které patří zejména cena, složitější konstrukce, menší robustnost a nemožnost stroj odbudít, což má za následek výskyt proudových momentových rázů při zkratu. Dalším nedostatkem synchronních motorů je, že se po připojení napětí nespustí. Důvodem je setrvačnost rotoru a také vysoká rychlost točivého magnetického pole, proto se musí využít některý ze systému rozběhu, aby získal stejné otáčky jako točivé pole. Spouštění synchronního motoru může být zajištěno:

- pomocným rozběhovým motorem,
- rozběhovým klecovým vinutím (asynchronní rozběh),
- frekvenčním měničem.

Při spouštění pomocným rozběhovým motorem se používá buď stejnosměrný generátor umístěný na hřídeli motoru, nebo asynchronní motor pro rozběhy motorů s velkými výkony. Tento typ je nejméně využíván. Při asynchronním rozběhu je na rotoru kromě budícího vinutí umístěno klecové

vinutí. Motor se tedy spouští jako asynchronní motor nakrátko. Jakmile motor dosáhne otáček blízkých synchronním, nabudí se a rotor je vtáhnut do synchronismu. V současné době se nejvíce používá rozběh pomocí frekvenčního měniče, který umožňuje plynule zvyšovat kmitočet. Frekvenční měniče pak musí mít speciální software pro řízení synchronních motorů.

2.1 Způsoby řízení SM

Nejčastějšími způsoby řízení SM jsou:

- skalární,
- vektorové,
- přímé řízení momentu.

2.1.1 Skalární řízení

Při skalárním řízení se reguluje požadovaná rychlost otáčení motoru pomocí změny frekvence napájecího napětí. Se změnou frekvence se však musí měnit i velikost napájecího napětí v poměru $U/f = \text{konstantní}$. Tato podmínka zajišťuje, že bude konstantní i magnetický tok statoru. Při nedodržení této podmínky dochází při snižování frekvence k přebuzení a při zvyšování frekvence naopak k podbuzení vlivem konstantního napětí. Při splnění této podmínky se tedy motor nachází ve stavu, kdy není ani podbuzen ani přebuzen. Řízení U/f ale platí až od vyšších frekvencí. V oblasti nižších frekvencí se udržuje napájecí napětí konstantní.

Skalární řízení zajišťuje chod v optimálním režimu pouze v ustáleném stavu. Velkou výhodou je jednoduché řízení bez finančně náročných snímačů. Nevýhodou je kromě toho, že neumožňuje chod v optimálním režimu během přechodových dějů i to, že nedosáhne špičkových dynamických parametrů. Příznivé výsledky tohoto řízení jsou u pohonů, kde je méně častá změna řídicí nebo poruchové veličiny [3].

2.1.2 Vektorové řízení

Všechny metody vektorového řízení využívají podobný princip, který na základě snímaných veličin, kterými jsou statorové proudy, napětí a otáčky, vypočítává z matematického modelu synchronního motoru magnetický tok a moment. Základní princip spočívá v rozložení prostorového vektoru statorového proudu do dvou navzájem kolmých složek v rotujícím souřadnicovém systému tak, aby se navzájem neovlivňovaly. Momentotvorná složka vektoru statorového proudu určuje s příslušným vektorem magnetického toku moment stroje. Magnetizační složka ležící ve směru vektoru magnetického toku ovlivňuje magnetizaci motoru. Při regulaci rychlosti PMSM je vhodné orientovat prostorový vektor statorového toku v systému rotorových souřadnic $[d, q]$.

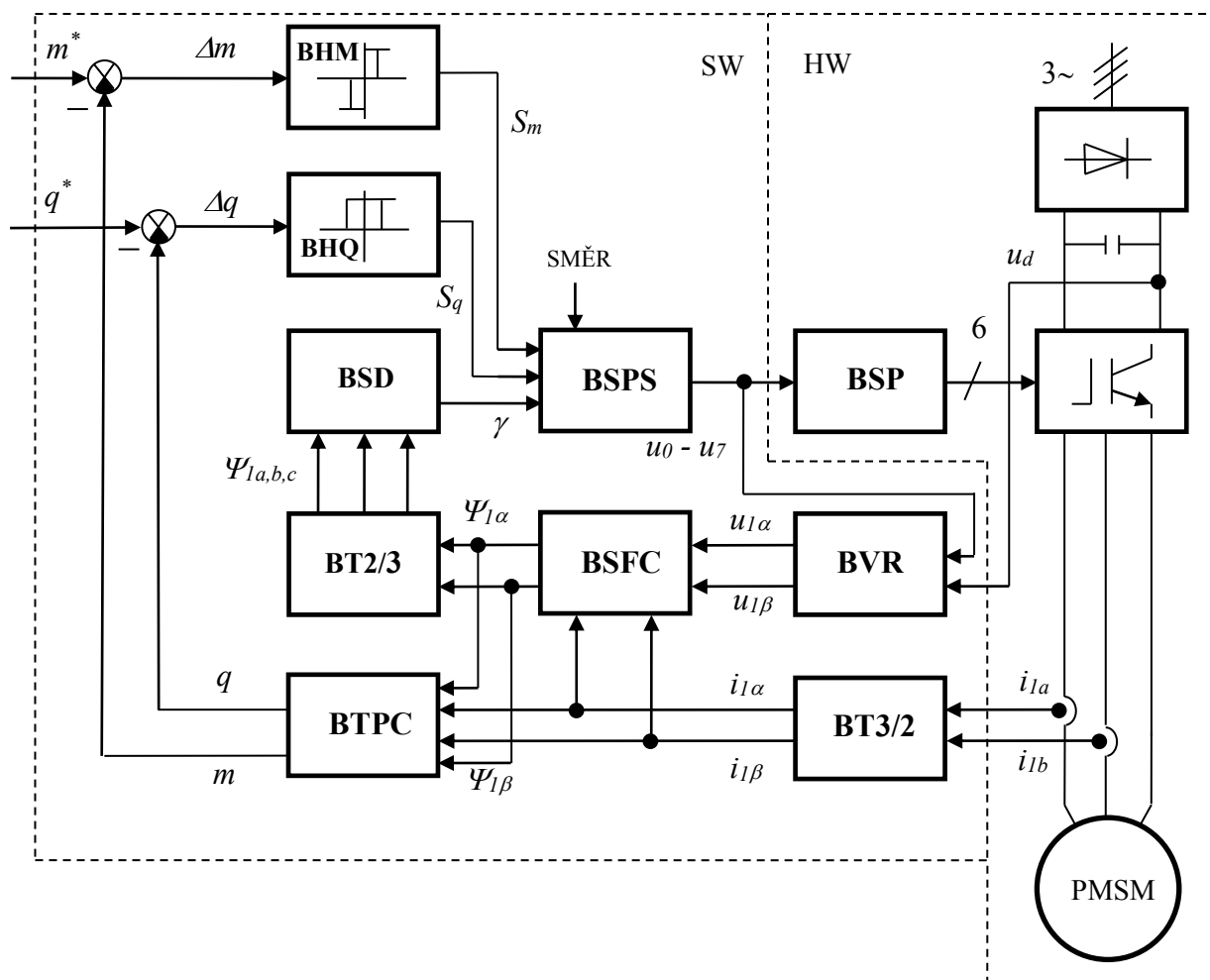
Vektorové řízení umožňuje provoz v optimálním režimu jak v ustáleném stavu, tak v přechodových dějích. Regulační obvod se vyznačuje velice přesným řízením, minimálním zpožděním a vysokou dynamikou pohonu. Částečnou nevýhodou této metody je složitost výpočetních algoritmů a nutnost znát polohu rotoru v každém okamžiku [3].

3. PŘÍMÉ ŘÍZENÍ MOMENTU SYNCHRONNÍHO MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY

Metoda přímého řízení momentu (DTC) vyniká především svou jednoduchostí oproti vektorovému řízení a to z toho důvodu, že není nutné znát informaci o poloze. Mezi další přednosti patří vysoká robustnost a schopnost rychlé změny momentu. Vektorové řízení však naopak dosahuje vyšší přesnosti řízení.

U této metody se využívá pro regulaci přímo moment stroje m a jalový výkon q ve zvoleném tolerančním pásmu, na rozdíl od vektorového řízení, kde se regulují složky statorového proudu. DTC spočívá především ve vytvoření točivého magnetického pole statoru pomocí spínacích vektorů statorového napětí, které se získávají komparací vypočtených hodnot z matematického modelu synchronního motoru s žádanými hodnotami. Výběr napěťového vektoru pak určí optimální kombinaci sepnutí výkonových spínačů nepřímého měniče frekvence [3].

Pro konkrétní popis přímého řízení momentu synchronního motoru s permanentními magnety (DTC-PMSM) byla vybrána metoda vyučující se zde na VŠB-TUO. Blokové schéma je zobrazeno na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Blokové schéma synchronního motoru s přímým řízením momentu [3].

Legenda k Obr. 3.1:

PMSM	Synchronní motor s permanentními magnety
BT3/2	Blok transformace 3/2
BVR	Blok rekonstrukce napětí
BSFC	Blok výpočtu statorového toku
BTPC	Blok výpočtu jalového výkonu a momentu
BT2/3	Blok transformace 2/3
BSD	Blok vyhodnocení sektoru
BHQ a BHM	Dvoupolohové hysterezní regulátory
BSPS	Blok výběru spínací frekvence
BSP	Blok tvorby pulzů

3.1 Popis blokové struktury

V první řadě si můžeme všimnout, že je blokové schéma rozděleno na hardwarovou část (HW) obsahující motor a nepřímý měnič kmitočtu s napěťovým meziobvodem a softwarovou část (SW), která zajišťuje algoritmy DTC pomocí mikropočítačového řídicího systému.

3.1.1 BT3/2

Okamžité hodnoty statorových proudů i_{1a} a i_{1b} jsou přivedeny na vstup bloku transformace 3/2 pomocí snímače proudů. Tento blok provádí transformaci z trojfázového systému [a, b, c] do dvouosého souřadnicového systému [α , β]. Vztah mezi nimi je dán:

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{bmatrix} = [T3/2] \cdot \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{bmatrix} \quad (3.1.1.1)$$

Stejným způsobem se pak dá provést transformace jiného trojfázového systému. Výstupem tohoto bloku jsou tedy jednotlivé složky prostorového vektoru statorového proudu $i_{1\alpha}$ (reálná) $i_{1\beta}$ (imaginární) [3].

3.1.2 BVR

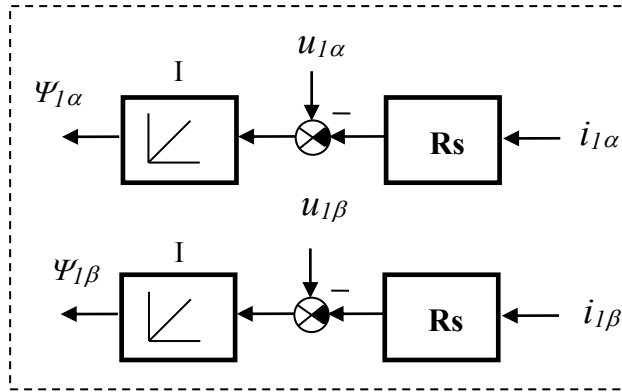
Blok rekonstrukce napětí vytváří složky statorového napětí $u_{1\alpha}$ a $u_{1\beta}$ ve statorovém souřadnicovém systému. Těmto složkám jsou přiřazeny hodnoty dle výběru napěťového vektoru (u_0 - u_7) z bloku výběru spínací kombinace a okamžité hodnoty napětí v meziobvodu u_d nepřímého měniče kmitočtu, která je změřena napěťovým snímačem. Výběr výstupních hodnot pro všechny napěťové vektory je zobrazen v Tab. 3.1 [3].

Tab. 3.1 Složky statorového napětí pro jednotlivé vektory napětí

Vektor napětí	u_0	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7
$u_{1\alpha}$	0	$2/3 u_d$	$1/3 u_d$	$-1/3 u_d$	$-2/3 u_d$	$-1/3 u_d$	$1/3 u_d$	0
$u_{1\beta}$	0	0	$1/\sqrt{3} u_d$	$1/\sqrt{3} u_d$	0	$-1/\sqrt{3} u_d$	$-1/\sqrt{3} u_d$	0

3.1.3 BSFC

Pomocí tohoto bloku získáme složky statorového magnetického toku $\Psi_{1\alpha}$ a $\Psi_{1\beta}$. Vstupními proměnnými jsou složky statorového proudu a složky statorového napětí určené z předchozích bloků. Vnitřní uspořádání BSFC je zobrazeno na Obr. 3.2.



Legenda k obr. 3.2:

- R_s Odpor jedné fáze statorového vinutí motoru.
 I Integrační členek.

Obr. 3.2 Vnitřní schéma bloku BSFC.

Z Obr. 3.2 lze vyvodit vztah pro výpočet složek magnetického toku [3]:

$$\Psi_{1\alpha} = \int (u_{1\alpha} - R_s i_{1\alpha}) dt \quad (3.1.3.1)$$

$$\Psi_{1\beta} = \int (u_{1\beta} - R_s i_{1\beta}) dt \quad (3.1.3.2)$$

3.1.4 BTPC

Na základě vstupních veličin, kterými jsou složky statorového magnetického toku a složky prostorového vektoru statorového proudu, tento blok vypočítává skutečnou hodnotu elektromagnetického momentu a jalového výkonu dle vztahu:

$$m = k_m (\Psi_{1\alpha} i_{1\beta} - \Psi_{1\beta} i_{1\alpha}) \quad (3.1.4.1)$$

$$q = k_m \omega_m (\Psi_{1\alpha} i_{1\alpha} + \Psi_{1\beta} i_{1\beta}) \quad (3.1.4.2)$$

kde ω_m je mechanická úhlová rychlost a konstanta k_m je definována jako:

$$k_m = \frac{3}{2} \cdot p_p \quad (3.1.4.3)$$

kde p_p je počet pólů motoru.

Obě vypočtené hodnoty m a q jsou dále posílány do rozdílových členů, kde se porovnávají s žádanou hodnotou momentu m^* a jalového výkonu q^* . Rozdíl těchto hodnot je pak vstupní veličinou hysterezních regulátorů BHQ a BHM. Pro činnost synchronního motoru s maximálním účínkem se volí žádaná hodnota jalového výkonu $q^* = 0$ [3].

3.1.5 BT2/3

Na vstup bloku transformace 2/3 jsou přivedeny složky statorového toku. Tento blok je opakem bloku T3/2, tedy převádí veličiny z dvouosého souřadnicového systému $[\alpha, \beta]$ do trojfázového systému $[a, b, c]$ a vytvoří tak složky Ψ_{1a} , Ψ_{1b} , Ψ_{1c} . Transformace probíhá dle vztahu:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{1a} \\ \Psi_{1b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_{1\alpha} \\ \Psi_{1\beta} \end{bmatrix} = [T2/3] \cdot \begin{bmatrix} \Psi_{1\alpha} \\ \Psi_{1\beta} \end{bmatrix} \quad (3.1.5.1)$$

Pro jednotlivé složky pak platí [3]:

$$\Psi_{1a} = \Psi_{1\alpha} \quad (3.1.5.2)$$

$$\Psi_{1b} = -\frac{1}{2} \Psi_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \Psi_{1\beta} \quad (3.1.5.3)$$

$$\Psi_{1c} = -\frac{1}{2} \Psi_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \Psi_{1\beta} \quad (3.1.5.4)$$

3.1.6 BSD

V tomto bloku probíhá vyhodnocení úhlu γ , který určuje sektor, ve kterém se nachází vektor magnetického toku. Vyhodnocení probíhá dle znamének okamžitých hodnot fázových statorových magnetických toků Ψ_{1a} , Ψ_{1b} , Ψ_{1c} získané transformací 3/2 viz Tab. 3.2 [3].

Tab. 3.2 Vyhodnocení sektoru polohy vektoru magnetického toku.

$\gamma \Rightarrow$ sektor	signum Ψ_{1a}	signum Ψ_{1b}	Signum Ψ_{1c}
$-30^\circ \div 30^\circ \Rightarrow$ I	+	-	-
$30^\circ \div 90^\circ \Rightarrow$ III	+	+	-
$90^\circ \div 150^\circ \Rightarrow$ II	-	+	-
$150^\circ \div 210^\circ \Rightarrow$ VI	-	+	+
$210^\circ \div 270^\circ \Rightarrow$ IV	-	-	+
$270^\circ \div -30^\circ \Rightarrow$ V	+	-	+

3.1.7 BHM a BHQ

Vstupem hysterezních regulátorů je rozdíl žádaných hodnot momentu m^* a jalového výkonu q^* zadané uživatelem od vypočtených hodnot m a q v předchozích blocích. Řízení výstupu dvoupolohových regulátorů lze popsat následovně:

$$\begin{aligned} q^* - q > HQ &\rightarrow S_q = 1, u_{1x} > 0 \\ q^* - q < -HQ &\rightarrow S_q = 0, u_{1x} < 0 \\ m^* - m > HM &\rightarrow S_m = 1, u_{1y} > 0 \\ m^* - m < -HM &\rightarrow S_m = 0, u_{1y} < 0 \end{aligned} \quad (3.1.7.1)$$

kde H_Q a H_M jsou požadovaná hysterezní pásma a proměnné u_{Ix} a u_{Iy} jsou složky vektoru statorového napětí. Složka v ose x ovlivňuje magnetizaci motoru a tedy i jalový výkon, zatímco složka v ose y ovlivňuje moment motoru. Výsledkem komparace jsou pak signály S_q a S_m , které spolu s úhlem γ a požadovaným směrem určují napěťový vektor v následujícím bloku [3].

3.1.8 BPS

Výběr napěťového vektoru probíhá dle spínací tabulky (Tab. 3.3).

Tab. 3.3 Spínací tabulka pro kladný a záporný směr otáčení.

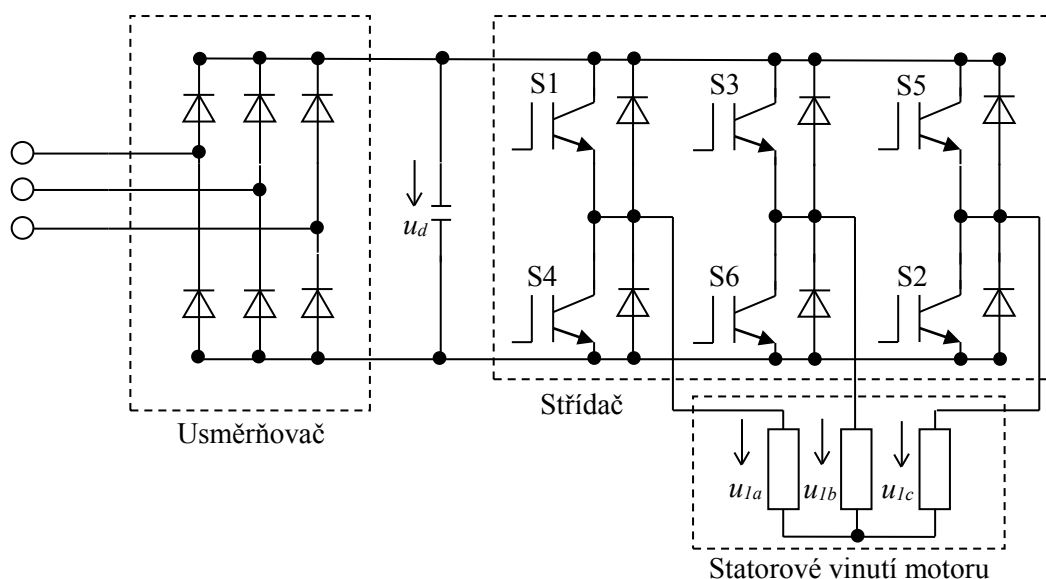
Kladný směr otáčení					
$\gamma \Rightarrow$ sektor	S_q	1	0	1	0
	S_m	1	1	0	0
$-30^\circ \div 30^\circ \Rightarrow$ I		u_2	u_3	u_7	u_0
$30^\circ \div 90^\circ \Rightarrow$ III		u_3	u_4	u_0	u_7
$90^\circ \div 150^\circ \Rightarrow$ II		u_4	u_5	u_7	u_0
$150^\circ \div 210^\circ \Rightarrow$ VI		u_5	u_6	u_0	u_7
$210^\circ \div 270^\circ \Rightarrow$ IV		u_6	u_1	u_7	u_0
$270^\circ \div -30^\circ \Rightarrow$ V		u_1	u_2	u_0	u_7

Záporný směr otáčení					
$\gamma \Rightarrow$ sektor	S_q	1	0	1	0
	S_m	1	1	0	0
$-30^\circ \div 30^\circ \Rightarrow$ I		u_6	u_5	u_7	u_0
$30^\circ \div 90^\circ \Rightarrow$ III		u_1	u_6	u_0	u_7
$90^\circ \div 150^\circ \Rightarrow$ II		u_2	u_1	u_7	u_0
$150^\circ \div 210^\circ \Rightarrow$ VI		u_3	u_2	u_0	u_7
$210^\circ \div 270^\circ \Rightarrow$ IV		u_4	u_3	u_7	u_0
$270^\circ \div -30^\circ \Rightarrow$ V		u_5	u_4	u_0	u_7

Jestliže se vektor statorového toku vyskytuje v sektoru V a výstupní proměnné z dvoupolohového regulátoru jsou $S_q = 1$ a $S_m = 1$, pak pro kladný směr otáčení je vybrán vektor u_1 a pro záporný směr otáčení vektor u_5 . Tento vektor je pak přiveden jednak zpět do bloku BVR a na blok spínacích pulsů pro nepřímý měnič knitočtu TFC [3].

3.1.9 TFC

Nepřímý měnič kmitočtu s napěťovým meziobvodem složí pro napájení PMSM. Zjednodušené schéma je zobrazeno na Obr. 3.3. Skládá se z neřízeného usměrňovače na vstupu, napěťového střídače na výstupu a velkého kondenzátoru v meziobvodu, který lze považovat za zátěž pro usměrňovač i jako zdroj pro napěťový střídač. Spínače S1 až S6 jsou tvořeny výkonovými spínacími tyristory.



Obr. 3.3 Zjednodušené schéma nepřímého měniče kmitočtu s napěťovým meziobvodem.

Každý z napěťových vektorů vystupující z bloku BSPS odpovídá určité spínací kombinaci těchto výkonových spínačů střídače dle Tab 3.4, která určuje napětí na jednotlivých fázích statorového vinutí motoru [3].

Tab. 3.4 Určení fázových napětí pro jednotlivé spínací kombinace.

Vektor	u_0	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7
Kombinace	000	100	110	010	011	001	101	111
Sepnuté spínače	S4,S6,S2	S1,S6,S2	S1,S3,S2	S4,S3,S2	S4,S3,S5	S4,S6,S5	S1,S6,S5	S1,S3,S5
U_{1a}	0	$2/3 u_d$	$1/3 u_d$	$-1/3 u_d$	$-2/3 u_d$	$-1/3 u_d$	$1/3 u_d$	0
U_{1b}	0	$-1/3 u_d$	$1/3 u_d$	$2/3 u_d$	$1/3 u_d$	$-1/3 u_d$	$-2/3 u_d$	0
U_{1c}	0	$-1/3 u_d$	$-2/3 u_d$	$-1/3 u_d$	$1/3 u_d$	$2/3 u_d$	$1/3 u_d$	0

3.2 Reverzace

U metody DTC, jak u synchronních tak asynchronních motorů, kdy jsou zapotřebí spínací tabulky pro řízení momentu, dochází k velkému překmitu momentu v průběhu reverzace. Hlavní problém spočívá v tom, že tabulky jsou navrženy pro případ, kdy hodnoty otáček motoru a žádaného momentu jsou buď obě kladné, nebo záporné (Tab. 3.3).

Pro správné spínání napěťových vektorů v průběhu reverzace je vhodné provést změnu spínací tabulky na tu, ve které nejsou obsaženy nulové vektory (u_0 a u_7), které se spínají při požadavku na snížení hodnoty momentu nebo jalového výkonu. Během brzdění tedy bude docházet ke spínání aktivních vektorů (u_1 - u_6), tak aby se otáčel vektor magnetického toku statoru ve směru pohybujícího se rotoru. Nevýhodou je však deformace napětí a rozkmit momentu.

Na základě těchto poznatků byly vytvořeny spínací tabulky (Tab. 3.5), které jsou použity během reverzace, neboli v okamžiku, kdy znaménko otáček není shodné se znaménkem žádaného momentu.

Tab. 3.5 Spínací tabulka pro kladný a záporný směr otáčení.

Kladný směr otáčení					
$\gamma \Rightarrow$ sektor	S_q	1	0	1	0
	S_m	1	1	0	0
$-30^\circ \div 30^\circ \Rightarrow$ I		u_2	u_3	u_6	u_5
$30^\circ \div 90^\circ \Rightarrow$ III		u_3	u_4	u_1	u_6
$90^\circ \div 150^\circ \Rightarrow$ II		u_4	u_5	u_2	u_1
$150^\circ \div 210^\circ \Rightarrow$ VI		u_5	u_6	u_3	u_2
$210^\circ \div 270^\circ \Rightarrow$ IV		u_6	u_1	u_4	u_3
$270^\circ \div -30^\circ \Rightarrow$ V		u_1	u_2	u_5	u_4

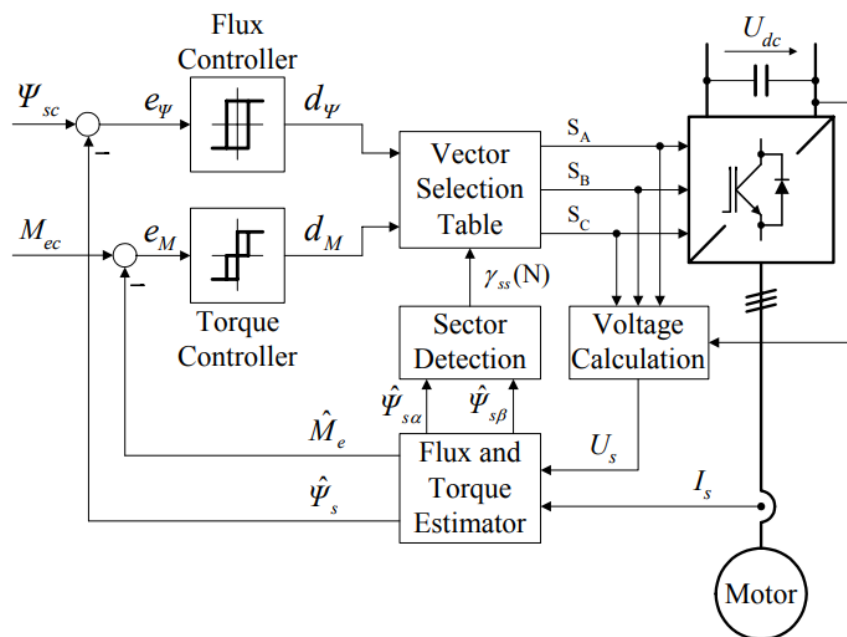
Záporný směr otáčení					
$\gamma \Rightarrow$ sektor	S_q	1	0	1	0
	S_m	1	1	0	0
$-30^\circ \div 30^\circ \Rightarrow$ I		u_6	u_5	u_2	u_3
$30^\circ \div 90^\circ \Rightarrow$ III		u_1	u_6	u_3	u_4
$90^\circ \div 150^\circ \Rightarrow$ II		u_2	u_1	u_4	u_5
$150^\circ \div 210^\circ \Rightarrow$ VI		u_3	u_2	u_5	u_6
$210^\circ \div 270^\circ \Rightarrow$ IV		u_4	u_3	u_6	u_1
$270^\circ \div -30^\circ \Rightarrow$ V		u_5	u_4	u_1	u_2

V rámci diplomové práce byl navržen algoritmus realizující právě výše popsanou metodu DTC-PMSM. Existuje však řada jiných postupů, jak dosáhnout přímého řízení momentu. V zahraniční literatuře se setkáme nejčastěji s podobnou metodou, která se nazývá ST-DTC.

3.3 ST-DTC

Základní princip ST-DTC (Switch Table nebo někdy také označované jako Selection Table) spočívá v řízení statorového toku Ψ_{sc} a elektromagnetického momentu M_{ec} , které jsou zároveň vstupními veličinami. Tyto veličiny se porovnávají s odhadovanými veličinami Ψ_s a M_e . Jejich rozdíly e_ψ a e_M jsou přivedeny na hysterezní komparátory. Digitalizované výstupy d_ψ , d_M z komparátorů a určený sektor pak vybírají jeden z napětových vektorů dle výběrové tabulky (Tab. 3.6). Ten pak vytváří pulsy S_A , S_B , S_C , které řídí stav měniče [4].

Blokové schéma této metody je znázorněno na Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Blokové schéma ST-DTC [4].

Základní částí je blok Flux and Torque Estimator, neboli odhad statorového magnetického toku a momentu, který představuje matematický model PMSM. Do tohoto bloku vstupují okamžité hodnoty fázových proudů I_s a statorového napětí U_s . Tyto veličiny pak určují velikost vektoru statorového toku Ψ_s , velikost momentu M_e a úhel γ .

Tab. 3.6 Spínací tabulka ST-DTC [4].

d_ψ	d_M	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6
1	1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
	0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0
	-1	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
0	1	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
	0	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7
	-1	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4

Výstupní signály d_ψ , d_M jsou definovány jako:

$$\begin{aligned}
 d_\psi &= 1 && \text{pro } e_\psi > H_\psi \\
 d_\psi &= 0 && \text{pro } e_\psi < -H_\psi \\
 d_M &= 1 && \text{pro } e_M > H_M \\
 d_M &= 0 && \text{pro } e_M = 0 \\
 d_M &= -1 && \text{pro } e_M < -H_M
 \end{aligned} \tag{3.3.1}$$

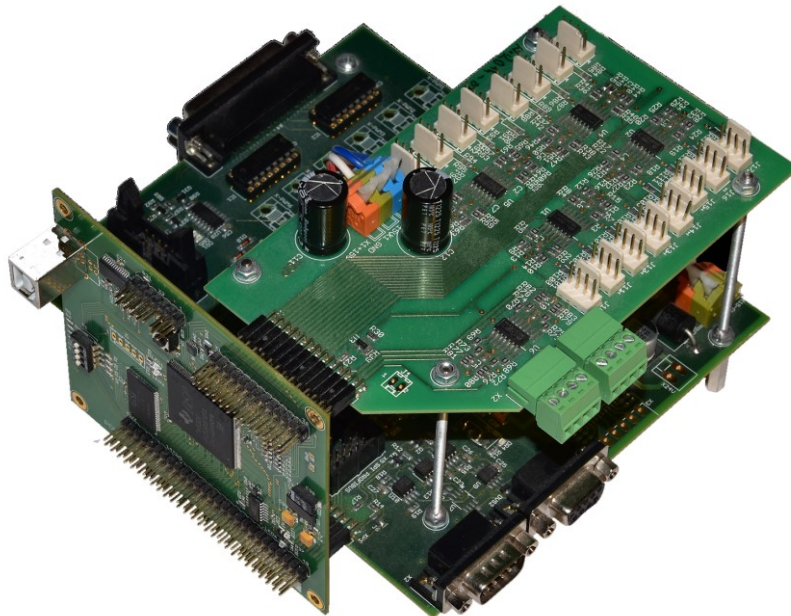
4. IMPLEMENTACE ALGORITMU PMSM-DTC DO ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Tato kapitola se bude zabývat popisem řídicího systému s digitálním signálovým kontrolérem TMS320F28335 od firmy Texas Instruments, do kterého byl implementován algoritmus, popisující PMSM-DTC a dále popisem vývojového softwaru s některými důležitými částmi zdrojového programu.

4.1 Řídicí systém s TMS320F28335

Řídicí systém (ŘS) s DSP TMS320F28335 se skládá ze tří desek plošných spojů.

- Procesorová
- Analogová
- Digitální



Obr. 4.1 Řídicí systém s DSP TMS320F28335.

Na procesorové desce (boční) je umístěn signálový procesor TMS320F28335, dále rozhraní JTAG pro propojení s PC, rozhraní SPI, USB pro komunikaci s LabVIEW a 12-bitový digitálně-analogový převodník se čtyřmi výstupními kanály.

Analogová deska (horní) obsahuje 16 analogových vstupů na připojení proudových a napěťových čidel a D/A výstup.

Digitální deska (spodní) se skládá z 6 PWM modulů, logických obvodů ovládající jejich výstup, procesoru Atmel Atmega168A a konektorů pro měření teploty.

Napájecí napětí přivedené na vstupní svorky digitální desky je 24V [5].

4.1.1 TMS320F28335

DSP řady TMS320F28xxx patří do rodiny TMS320C2000, ve které se může zpracovávat výpočetní operace jak v pevné, tak v plovoucí řádové čárce. DSP TMS320F28335 je vhodný pro náročné aplikace. Sběrnice jsou zde řešeny pomocí modifikované Harvardské architektury, což znamená, že je oddělena paměť programu a dat.

Základní vlastnosti [7]:

- Frekvence jádra je 150MHz (doba cyklu 6,67 ns)
- Výkonné 32-bitové jádro
- Rychlá odezva přerušení
- Rozšířené ovládací periferie
- 3 x 32-bitové časovače
- 6 x modul pro vytvoření PWM
- Obsahuje rozhraní JTAG
- PIE umožňuje 58 externích přerušení
- Paměť ROM 8K x 16, RAM 68KB, Flash 512 KB
- Sériové porty – 2 x CAN modul, SPI, 3 x SCI (UART), I2C
- 88 GPIO pinů

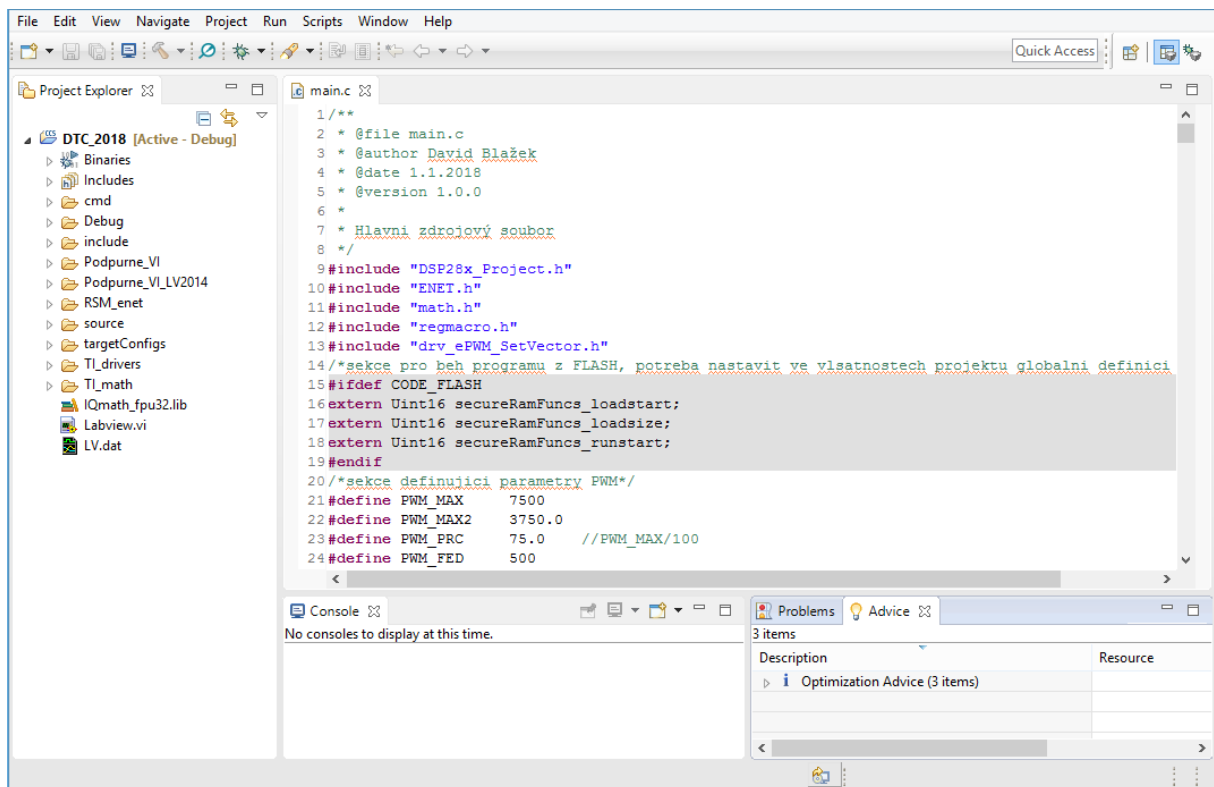
4.2 Popis zdrojového programu

Pro sestavení zdrojového kódu byla využita nejnovější verze softwaru od společnosti Texas Instruments, který má název Code Composer Studio 7.3.0. CCS je integrované vývojové prostředí označované jako IDE (Integrated Development Environment) určené pro procesory od firmy Texas Instruments. CSS obsahuje sadu nástrojů používaných k vývoji a ladění algoritmů v reálném čase pomocí SYS/BIOS, což je operační systém reálného času zajišťující možnost běhu více aplikací paralelně. Obsahuje také překladač C/C++, který překládá zdrojový program s koncovkou „.c“. Výsledný kód kompiluje pro příslušný mikrokontrolér [8].

K ladění programu pro TMS320f28335 je použit JTAG emulátor C2000 Series XDS510LC připojený přes USB do počítače. Výsledný program je psán v jazyce C a je přiložen k diplomové práci (Příloha č. I.). Tento program vychází z kostry, která byla součástí studijních materiálů.

4.2.1 Spuštění programu

Po prvotním spuštění programu CCS se nejdříve otevře okno Eclipse Launcher, kde se zvolí Workspace, neboli místo v počítači, kam se budou ukládat veškeré změny projektu. Po jeho zadání se otevře úvodní obrazovka, kde je možnost vybrat jednu ze čtyř možností a to New Project, Browse Examples, Import Project a App Center. Pro otevření souboru s kódem, který obsahuje PMSM-DTC algoritmy, se zvolí možnost Import projekt, kde se vybere extrahovaná příložená složka (Příloha č. I.). Po dokončení výběru naběhne hlavní okno programu (Obr. 4.2).



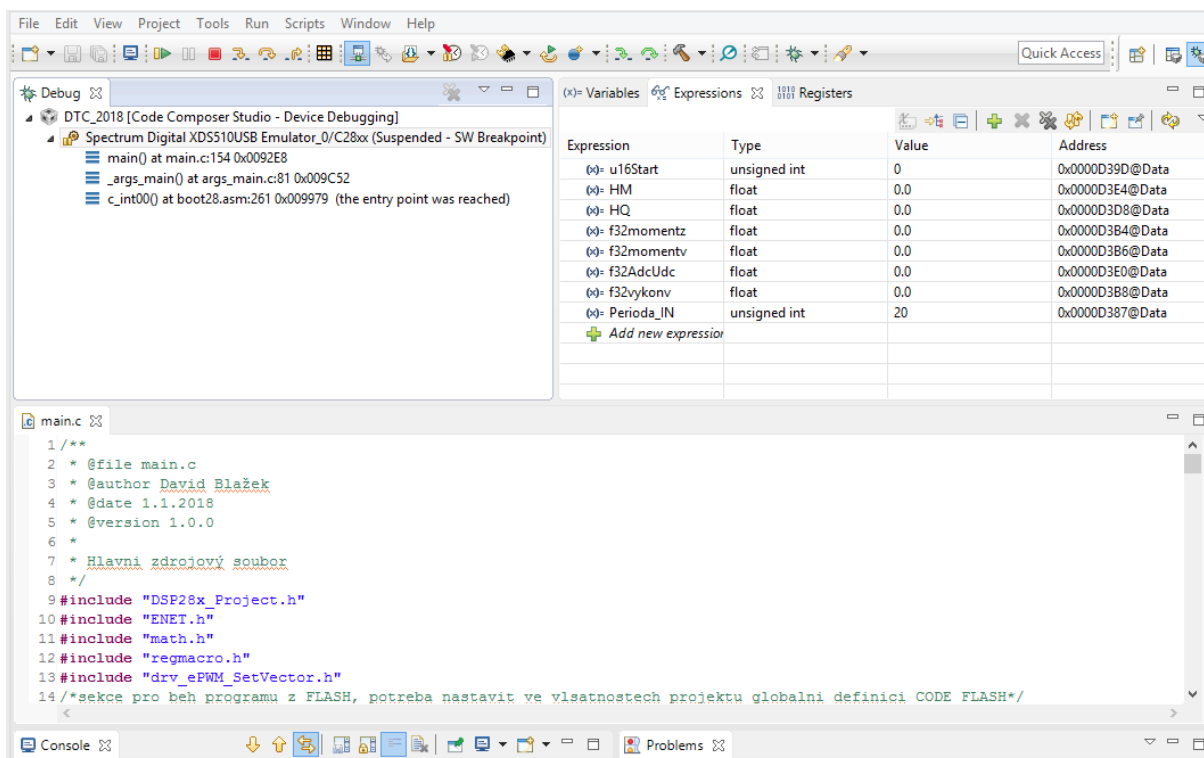
Obr. 4.2 Code Composer Studio 7.3.0.

Program CSS má hlavní okno rozděleno do více částí. Jednotlivé části se dají změnit nebo přemístit, avšak v základním nastavení je zobrazeno pouze Project Explorer, zobrazovací okno a Problems. V okně Project Explorer je načtený projekt DTC_2018, ve kterém jsou umístěny jednotlivé soubory a složky.

Includes	Obsahuje cestu ke všem hlavičkovým souborům, které byly specifikovány v možnostech projektu.
Cmd	Tato složka obsahuje soubor cmd, což je takzvaný „linker command file“. Linker určuje mapu paměti, neboli ví, jak umístit programový kód a data do paměti při překlada.
Debug	V této složce se nachází soubory Project.map a DTC_2018_linkInfo.xml, které jsou výstupem spojení programu.
Include	Obsahuje vytvořené hlavičkové soubory.
Podpurne_VI	Jedná se o soubory LabVIEW, které slouží pro komunikaci s řídicím systémem.
Source	Tvoří zdrojové soubory, mezi nimiž je i soubor main.c, který obsahuje hlavní funkce programu. Konkrétní popis tohoto souboru bude v následující podkapitole.
TargetConfigs	Uvnitř složky se nachází soubor ccxml, který obsahuje veškeré informace potřebné k propojení s cílovým zařízením.
Labview	Hlavní soubor LabVIEW obsahující uživatelské prostředí pro ovládání a měření veličin DTC (viz kapitola 6).

Při rozkliknutí některého ze souborů se daný soubor otevře v zobrazovacím okně, ve kterém se může upravovat. V okně Problems se vypisují veškeré chyby, které brání spuštění navrhnutého programu.

K samotnému spuštění programu se přejde pomocí zeleného tlačítka Debug nahoře v levé části obrazovky nebo klávesou F11. Tím se načte výstupní soubor projektu .OUT a spustí funkci main(). Projekt se poté přepne na nového okna CCS Debug určeného pro ladění programu (Obr.4.3).



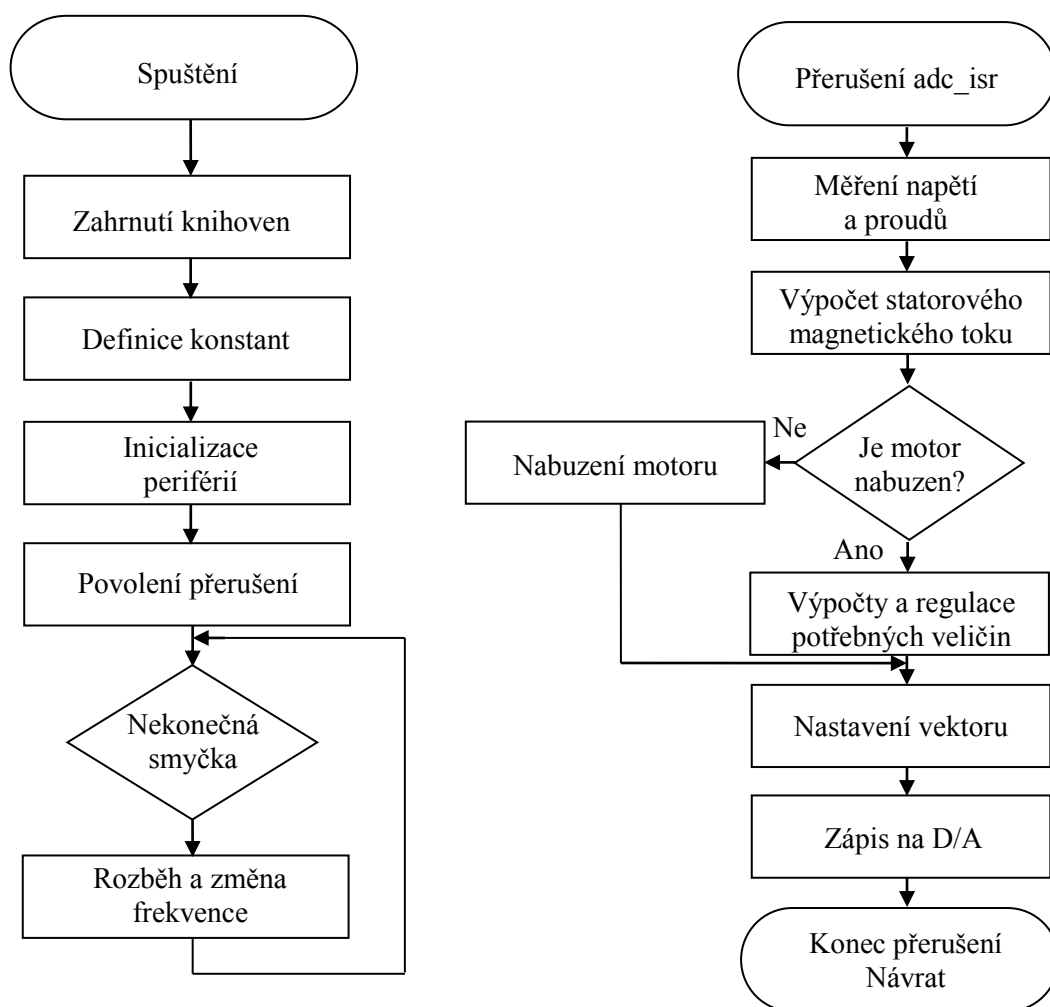
Obr. 4.3 Code Composer Studio 7.3.0. CCS Debug.

Hlavní okno je opět standardně Rozděleno do tří částí. Ve spodní části jsou zobrazeny naposledy otevřené soubory. Vlevo nahoře je okno s názvem Debug, ve kterém je vidět název aktivního projektu, který je spuštěn. V posledním okně vpravo nahoře jsou tři záložky a to Variables, Expressions a Registers, které ukazují výrazy, proměnné a registry. Proměnné lze přidat do tabulky pomocí add new expression a lze je poté sledovat i za běhu. Hodnoty se zde aktualizují po určitém čase, a tedy při rychlých změnách se nezobrazují správně [9].

Základní ovládací funkce (spustit, zastavit, ukončit, krok) jsou umístěny v liště v horní části obrazovky.

4.2.2 Hlavní struktura programu

Jak již bylo zmíněno, v souboru main.c jsou obsaženy hlavní funkce realizující algoritmus PMSM-DTC. Základní struktura programu je složena z hlavní smyčky pojmenovaná „main“ a smyčky přerušení „adc_isr“. Pro snadný popis těchto smyček jsou na Obr. 4.4 znázorněny vývojové diagramy. Veškeré funkce a proměnné jsou v programu komentovány pro lepší orientaci a přehlednost.



Obr. 4.4 Vývojové diagramy programu.

Po spuštění programu a zahrnutí potřebných hlavičkových souborů dochází k nadefinování všech konstant a proměnných, které jsou nastavené do výchozího stavu. Dále program přejde do hlavní smyčky, kde se nejdříve provede počáteční inicializace periférií, tzn. GPIO, ADC, SPI, PWM a poté povolí přerušení A/D převodníku. Po dokončení těchto operací přechází program do nekonečné smyčky, kde se kontroluje změna vzorkovací frekvence a tlačítko rozběhu, kterým se buď povolí, nebo zakáže výstup PWM.

Ve smyčce přerušení A/D převodníku je realizována celá regulační struktura vybrané metody přímého řízení PMSM. Přerušení je vyvoláno periférií PWM 1 při dosažení hodnoty čítače TBCTR na

nastavenou hodnotu registru TBPRD. Tato hodnota určuje spínací frekvenci. Výpočet vychází z následujícího zjednodušeného vztahu. V Tab. 4.1 jsou pak zobrazeny hodnoty registru TBPRD pro různé vzorkovací frekvence.

$$TBPRD = \frac{1}{4} \cdot \frac{f_{SYSCLCOUT}}{f_{vz}} \quad (4.2.2.1)$$

kde f_{vz} je vzorkovací frekvence a $f_{SYSCLCOUT}$ je frekvence jádra procesoru.

Tab. 4.1 Nastavení registru TBPRD.

TBPRD	f_{vz}
-	kHz
7500	5
3750	10
1875	20
1500	25

Při vykonávání přerušení `adc_isr` dochází nejdříve ke změření fázových proudů i_{1a} , i_{1b} a napětí v meziobvodu u_d . Poté program kontroluje, zda bylo zapnuto tlačítko rozběhu. Jestliže nebylo, program přejde na konec a tak nevykonává následující algoritmus. Po stisknutí tlačítka následuje transformace 3/2 fázových proudů $i_{1\alpha}$ a $i_{1\beta}$ a výpočet složek statorového napětí $u_{1\alpha}$ a $u_{1\beta}$. Z těchto hodnot jsou vypočteny složky magnetického toku $\Psi_{1\alpha}$, $\Psi_{1\beta}$ a modul vektoru magnetického toku $|\Psi_1^S|$.

Program dále kontroluje, zda došlo k nabuzení při podmínce $|\Psi_1^S| \geq \Psi^*$. Jestliže ne, provede se podprogram, který s určitou střídou přepíná mezi aktivním a nulovým vektorem. Vektor je pak nastaven na výstup PWM a dojde k ukončení přerušení.

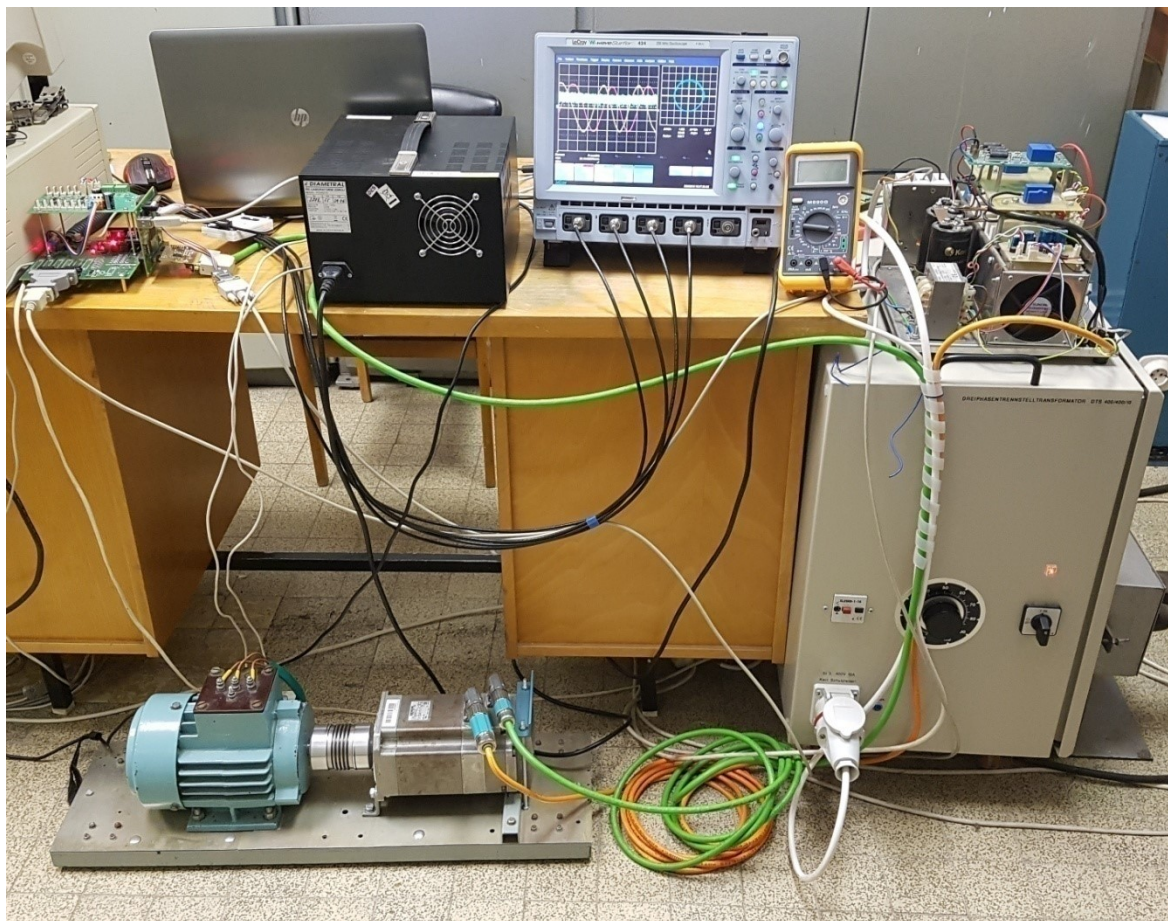
Jestliže je podmínka splněna a motor je tedy nabuzen, algoritmus pokračuje výpočtem momentu a jalového výkonu. Následně se provede transformace statorových složek do trojfázového systému, ze kterých se určí sektor. Požadovaný směr je nastaven podmínkou $m^* \geq 0$ pro kladný směr a pro záporný $m^* < 0$. Následuje vyhodnocení skutečného směru, který je potřeba určit pro ošetření motoru během reverzace. Skutečný směr se získává z polohy koncového bodu statorového toku. Algoritmus hlídá, v jakém sektoru se koncový bod pohybuje a do kterého sektoru přechází. Na základě toho vyhodnocuje směr. Není-li žádaný směr a skutečný směr stejný, provede se záměna spínací tabulky až do doby, kdy jsou oba směry stejné.

Z rozdílu vypočtených a zadáných hodnot jalového výkonu a momentu se pak určí výstupní hodnoty regulátorů a vybere se požadovaný vektor na výstup. Na konci přerušení probíhá vždy odeslání měřených veličin na D/A převodník, aktualizace časovače pro komunikaci s LabVIEW a ukončení přerušení.

Veškeré výpočty a určení veličin probíhají dle kapitoly 3.

5. LABORATORNÍ STANOVISŤE

Praktické měření a testování vytvořeného algoritmu DTC proběhlo v Laboratoři elektrických regulovaných pohonů - E103 na VŠB. K tomuto účelu byl použit frekvenční měnič, motorové soustrojí, čtyř kanálový osciloskop, proudové sondy, multimetr a PC. Pro představu je laboratorního stanoviště vyfoceno na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Laboratorní stanoviště.

5.1 Měnič

Zjednodušené schéma zapojení měniče je znázorněno na Obr. 3.3. Jedná se o nepřímý měnič kmitočtu s napětovým meziobvodem. Napájení je přivedeno ze sítě přes transformátor, pomocí kterého lze měnit efektivní hodnotu napětí přivedeného na usměrňovač. Usměrňovač je v můstkovém zapojení a neřízený, což znamená, že je tvořen pouze diodami. Meziobvod tvoří dva sériově zapojené kondenzátory o hodnotě 2200 μF . Výstup měniče tvoří střídač obsahující 6 spínacích prvků, které jsou realizovány IGBT tranzistory. Tyto tranzistory jsou spínané budičem, který je ovládán řídicím systémem. Měnič obsahuje také ochranné a signalizační prvky, které jsou připojené ke každému spínači.

Dále jsou na měniči umístěné čidla napětí a proudu od firmy LEM. Proudová čidla LAH 25-NP slouží pro snímání okamžitých hodnot proudů jednotlivých fází. Napětové čidlo LV25-600 snímá

okamžitou hodnotu v meziobvodu. Signály z čidel jsou posílány na analogový vstup ŘS. Pro převod analogových snímaných hodnot na digitální byly výsledné čísla násobené normami, které se vypočítaly ze vztahu pro napěťové čidlo [11]:

$$n_U = \frac{X_{MAX} \cdot R_P \cdot k_U}{b \cdot R_{MU}} = \frac{5 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,4}{2048 \cdot 200} = 0,2929 \quad (5.1.1)$$

A pro proudové čidlo [11] :

$$n_U = \frac{X_{MAX} \cdot k_I}{b \cdot R_{MI}} = \frac{5 \cdot 1000}{2048 \cdot 470} = 0,0051 \quad (5.1.2)$$

kde X_{MAX} je rozsah měřeného napětí analogového vstupu, R_P je předřadný odpor, b znázorňuje nejvyšší hodnotu převáděného slova A/D převodníku, k_U a k_I jsou převodní konstanty a R_{MU} a R_{MI} měřicí odpory pro napěťové a proudové čidlo.

5.2 Motorové soustrojí

Označení motoru použitého v laboratoři Katedry Elektroniky je *1FK7063-5AF7* od firmy Siemens. Tento motor je spojen s asynchronním elektromotorem, který zde slouží pouze jako zátěž. Ze štítku motoru byly zjištěny jmenovité parametry motoru a dopočítaný jmenovitý moment motoru. Technické parametry jsou zobrazeny v Tab.5.1 a Tab.5.2.

Tab. 5.1 Štítkové parametry asynchronního motoru.

Typ motoru	C80 M04
Jmenovité otáčky	1380 min ⁻¹
Jmenovitý výkon	0,75 kW
Kmitočet napájecího napětí	50 Hz
Jmenovitý účinník	0,79
Hmotnost	20 kg

Výpočet jmenovitého momentu je určen ze vztahu:

$$M_n = \frac{P_n}{n_n} \cdot \frac{60}{2\pi} = \frac{750}{1380} \cdot 9,54 = 5,18 \text{ Nm} \quad (5.2.1)$$

kde P_n je jmenovitý výkon a n_n jmenovité otáčky.

Tab. 5.2 Parametry PMSM 1FK7063-5AF7 [12].

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
TECHNICKÁ DATA			
Jmenovité otáčky	n_N	3000	RPM
Počet pólů	$2p$	8	-
Jmenovitý moment	M_n	7,3	Nm
Jmenovitý proud	I_N	5,6	A
Stálý moment	M_0	11	Nm
Stálý proud	I_0	8	A
Moment setrvačnosti	J_{mot}	15,1	10^{-4} kgm^2
OPTIMÁLNÍ PROVOZNÍ HODNOTY			
Jmenovité otáčky	n_{opt}	3000	RPM
Jmenovitý výkon	P_{opt}	2,29	kW
MAXIMÁLNÍ HODNOTY			
Max. mechanické otáčky	n_{MAX}	7200	RPM
Max. moment	M_{MAX}	35	Nm
Proudová špička	I_{MAX}	28	A
FYZYKÁLNÍ KONSTANTY			
Momentová konstanta	k_T	1,37	Nm/A
Napěťová konstanta	k_E	87,5	V/1000 RPM
Odpor vinutí (při 20°C)	R_{ph}	0,65	Ω
Indukčnost vinutí	L_D	7,7	mH
Elektrická časová konstanta	T_{el}	11,8	ms
Mechanická časová konstanta	T_{mech}	1,56	ms
Teplotní časová konstanta	T_{th}	40	min
Hmotnost	m	11,5	kg

6. LABVIEW

Pro snadné zadávání vstupních hodnot do algoritmu PMSM-DTC a kontrolu některých důležitých parametrů bylo vytvořeno uživatelské prostředí v programu LabVIEW, které komunikuje mezi počítačem a řídicím systémem. Komunikace zde probíhá přes USB, jehož konektor je umístěn na procesorové desce.

LabVIEW je grafické vývojové prostředí od společnosti National Instruments, které slouží mimo jiné k tvorbě virtuálních přístrojů. Tento program je rozdělen na dvě části a to na:

- Čelní panel – Tato část slouží pro uživatele. Jsou zde většinou umístěny ovládací a indikační prvky, jako jsou tlačítka, přepínače, LED atd.
- Blokový diagram – tato část určuje činnost programu pomocí matematicko-logických bloků, které se navzájem propojují. Mezi tyto bloky patří různé funkce, terminály, subVI, konstanty atd.

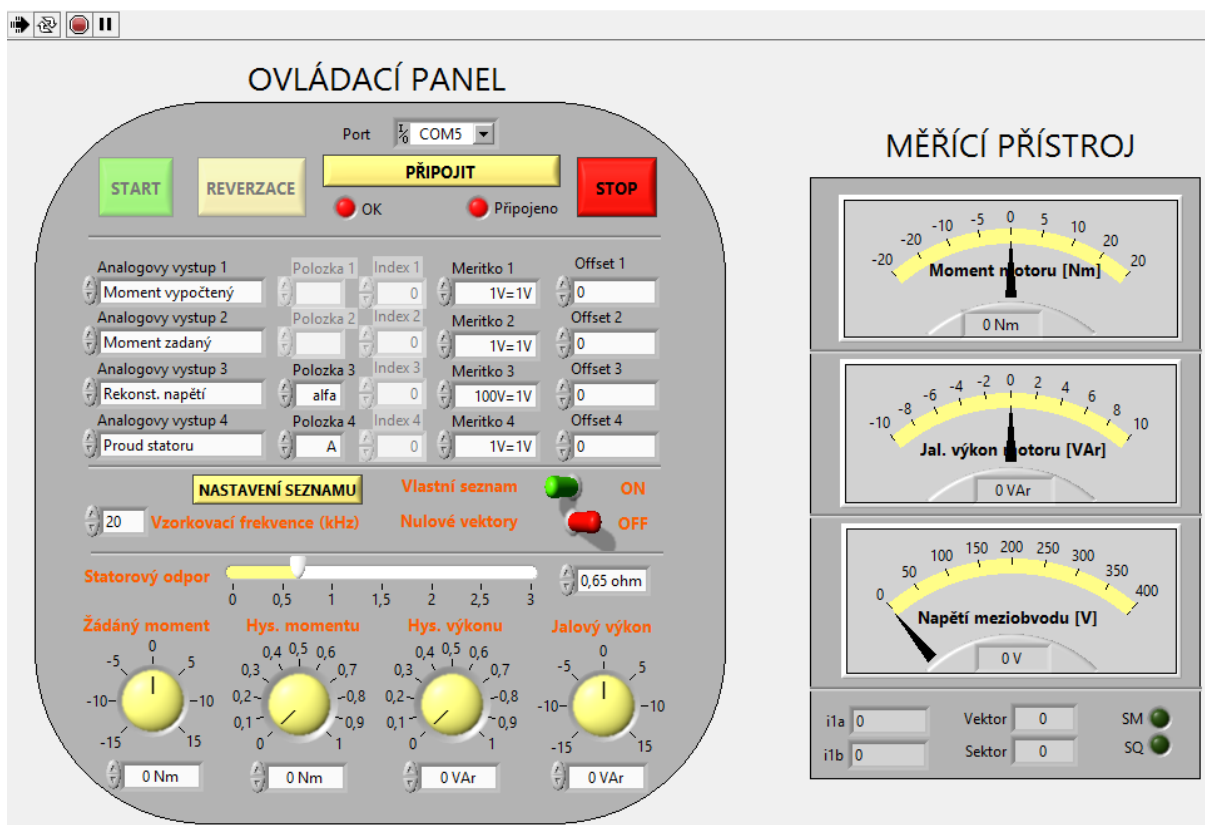
Obě části se vzájemně ovlivňují. Výstupním souborem celého programu je VI (Virtual Instruments).

Stejně jako u zdrojového programu, tak i vytvořené prostředí vychází z kostry, která byla dodána s podpůrnými soubory tzv. „subVI“. Tyto soubory slouží k provádění některých operací při komunikaci s řídicím systémem.

6.1 Spuštění programu

Vytvořený soubor je pojmenován Labview a nachází se v příloze ve složce s algoritmem DTC. Pro správnou funkčnost programu musí být vždy tento soubor umístěn ve stejné složce jako algoritmus. Dále musí být nainstalované rozhraní VISA a ovladač pro komunikaci s PC. Po otevření souboru se nejdříve načtou subVI umístěné ve složce podpurne_VI a poté se otevře čelní panel viz. Obr. 6.1.

Čelní panel je rozdělen do dvou částí a to na ovládací část (ovládací panel), která provádí zásah do algoritmu a měřicí část (měřicí přístroj), která sleduje okamžité hodnoty proměnných. Spuštění programu se provádí tlačítkem run v levém horním rohu.



Obr. 6.1 Čelní panel.

6.1.1 Ovládací panel

V horní části ovládacího panelu je umístěná komunikace programu s ŘS. Před začátkem komunikace je zapotřebí, aby byl program s algoritmem DTC spuštěn v CCS. Nejdříve se zvolí číslo portu COM a klikne na tlačítko **připojit**. Není-li komunikace úspěšná, vypíše se chybová hláška „Nelze se připojit“. Dokud neproběhne komunikace v pořádku, není možné kliknout na tlačítka start nebo reverzace. Proběhla-li komunikace úspěšně, rozsvítí se indikátor připojeno a odblokují se tlačítka.

Tlačítko **Start** slouží pro rozběh motoru. Tímto tlačítkem se povoluje výpočetní algoritmus ve smyčce přerušení a dochází k povolení PWM výstupu. Po jeho spuštění se tlačítko změní na Stop, kterým se algoritmus znovu vypne a zakáže výstup PWM. Dále se všechny vypočtené proměnné vynulují.

Tlačítko **Reverzace** slouží k otáčení motoru v opačném směru. Dochází tak ke skokové změně žádaného momentu na hodnotu opačnou. S tímto tlačítkem souvisí i přepínač nulové vektory viz dále. **Stop** tlačítko ukončuje ovládání celého programu. Dochází tím i k odpojení komunikace s ŘS.

Další část tvoří výběr veličin pro D/A převodník pro čtyř-kanálový osciloskop. Při kliknutí do pole **Analogový výstup 1** se rozbalí nabídka s možností výběru proměnné. Tuto proměnnou pak bude možné sledovat na prvním kanálu osciloskopu. Proměnné jsou vyčítány z main.c. Pro upřesnění výstupní proměnné slouží pole **položka** a **index**. **Měřítka** a **offset** pak slouží k úpravě průběhu.

Ve třetí části je vpravo možnost výběru **vlastního seznamu** pro výstupní veličiny D/A převodníku. Tato funkce slouží pro snadnou orientaci mezi proměnnými. Je-li tlačítko vypnuté (OFF), zobrazí se v poli **Analogový výstup** názvy proměnných, které jsou nadefinovány v main.c. Je-li tlačítko zapnuté (ON), zobrazí se jejich přepsané názvy. Pro vlastní přepis a výběr proměnných slouží „**NASTAVENÍ SEZNAMU**“.

Po kliknutí na toto tlačítko se zobrazí dvě tabulky viz Obr. 6.2. V levé tabulce jsou všechny dostupné proměnné. V druhé tabulce je pak možnost tyto proměnné přepsat dle vlastní volby. Do kolonky názvy proměnných se přepíše veličina z levé tabulky a na stejném řádku vpravo se přepíše její název. Tlačítkem OK se uloží veškeré změny a automaticky se přepne spínač do výběru vlastního seznamu.

V této části jsou zde další dvě možnosti a to změna **vzorkovací frekvence**, což má za následek přepis hodnoty TBPRD registru viz kapitola 3. Zde je na výběr buď 5, 10, 20 nebo 25 kHz a možnost vypnutí nebo zapnutí **nulových vektorů**.

Pokud jsou nulové vektory vypnuté, program s algoritmem DTC provede záměnu spínací tabulky pro výběr napěťového vektoru na tu, kde nejsou obsaženy nulové vektory (Tab. 3.5). Pokud je spínač zapnutý, budou tak vybírány při regulaci i nulové vektory (Tab. 3.3).

Seznam dostupných proměnných	
PsiModul	
TVZ	
f32AdcOffsetA	
f32AdcOffsetB	
f32Uda	
f32AdcUdcPomocna	
f32AdcUdc	
i1a	
i1b	
tvz	
oscSQ	
oscSM	
u1alfa	
u1beta	

Vlastní seznam proměnných	
Názvy proměnných	Přepsané názvy
f32momentz	Moment zadáný
f32momentv	Moment vypočtený
f32AdcUdc	Napětí v meziobvodu
sSSSI1	T3/2 proudu
sAbcAdcl1	Proud statoru
sABCpsi	T2/3 Magnetický tok
f32vykonz	Výkon zadáný
f32vykonv	Výkon vypočtený
HM	Hys momentu
HQ	Hys výkonu
sSSSurek	Rekonst. napětí
sSSSpsi	Magnetický tok

OK Zrušit

Obr. 6.2 Nastavení seznamu.

Poslední dolní část slouží ke změně vstupních veličin. Zde se nastavuje hodnota **statorového odporu**, **žádaného momentu**, **hystereze regulátoru momentu**, **hystereze regulátoru jakového výkonu** a **požadovaného jalového výkonu**. Hodnota statorového odporu je ve výchozím stavu nastavena na 0,65 Ω dle parametru motoru a hodnota hysterezních regulátorů na 0.

6.1.2 Měřicí přístroj

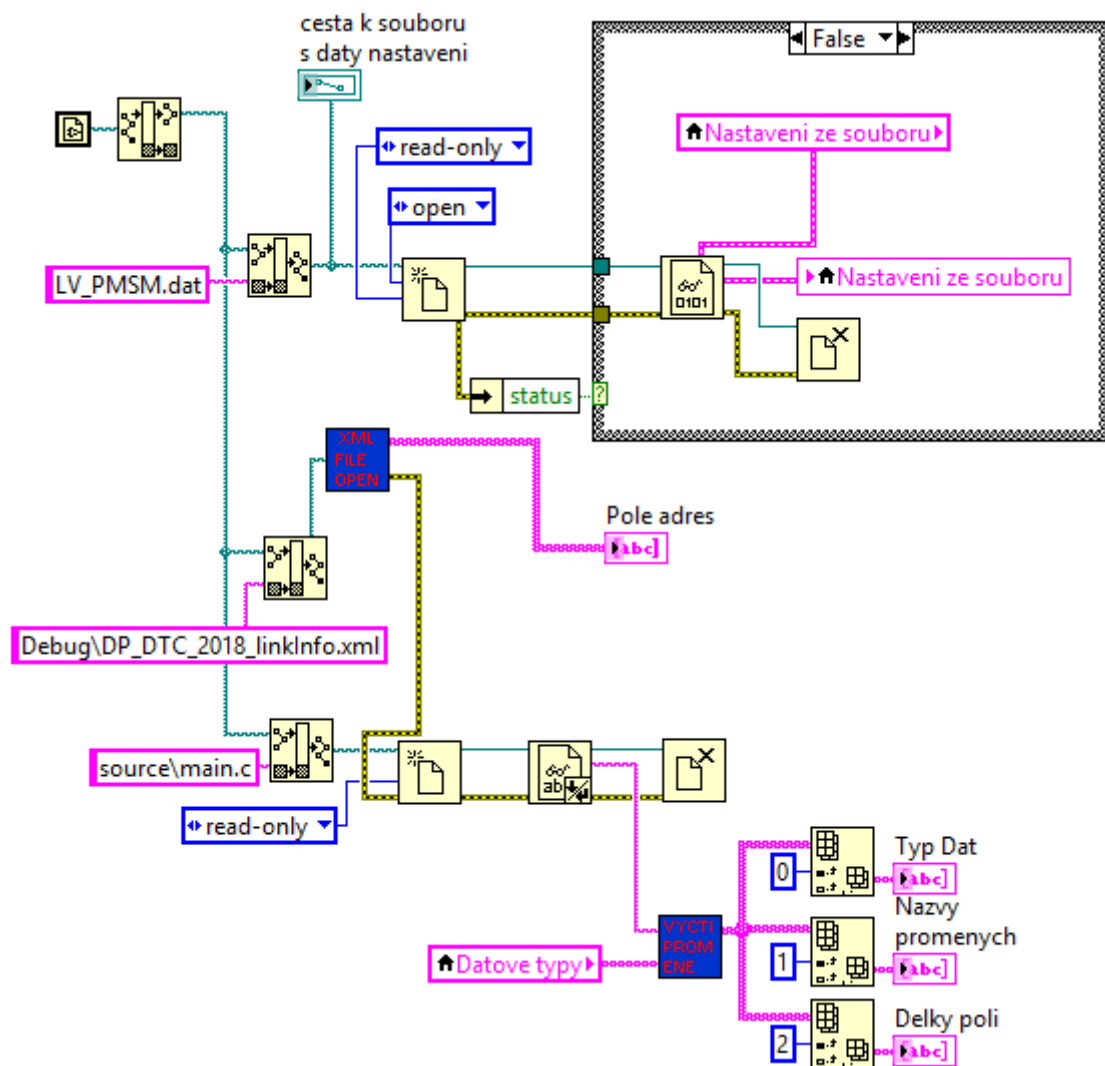
Měřicí přístroj slouží pouze pro zobrazení některých důležitých veličin algoritmu. Nelze tedy tyto veličiny nijak manuálně ovládat nebo upravovat. V horní části přístroje se zobrazuje skutečný moment motoru, skutečný jalový výkon a aktuální napětí v meziobvodu. Ve spodní části jsou pak vlevo měřené okamžité hodnoty statorových proudů dvou fází i_{la} a i_{lb} . Uprostřed se zobrazuje aktuální hodnota napěťového vektoru a sektor. Vpravo jsou pak indikátory výstupu hysterezních regulátorů. Při logické 1 dochází k jejich rozsvícení a při logické 0 k jejich zhasnutí. Měřené hodnoty napětí meziobvodu a statorových proudů jsou zobrazovány ihned po úspěšném propojení komunikace. Ostatní veličiny jsou zobrazovány až po klinutí na tlačítko start.

6.1.3 Blokový diagram

Do blokového diagramu se přejde pomocí záložky Window - Show Block Diagram nebo klávesovou zkratkou Ctrl+E. Celé blokové schéma je rozděleno do několika částí a to:

- Umístění ovládacích prvků a prvotní inicializace
- Načtení dat ze souboru
- Nastavení analogových výstupů
- Výběr vlastního seznamu pro D/A
- Spuštění a řízení programu
- Ukončení komunikace

Jak již bylo zmíněno výše, blokové schéma vychází z kostry [6]. Nově vytvořená změna v této blokové struktuře je způsobena nejnovější verzí CCS 7.3.0. V této verzi je totiž pozměněn soubor s příponou .map, ve kterém jsou obsaženy všechny názvy proměnných v kódu a jejich umístění v paměťových místech. Tento soubor již nepracuje efektivně s danou kostrou jako předtím, proto byl nahrazen souborem s příponou .xml a dodána nová knihovna XML file open.



Obr. 6.3 Načtení dat ze souboru.

7. OVĚŘENÍ METODY

Pro ověření metody s algoritmy DTC byly změřeny nejdůležitější veličiny na synchronním motoru s permanentními magnety 1FK7063-5AF7 (viz kapitola 5). Všechny průběhy byly naměřeny při stejném napětí v meziobvodu a to při 200 V, avšak při regulaci mohlo dojít k poklesu napětí vlivem měkkého zdroje.

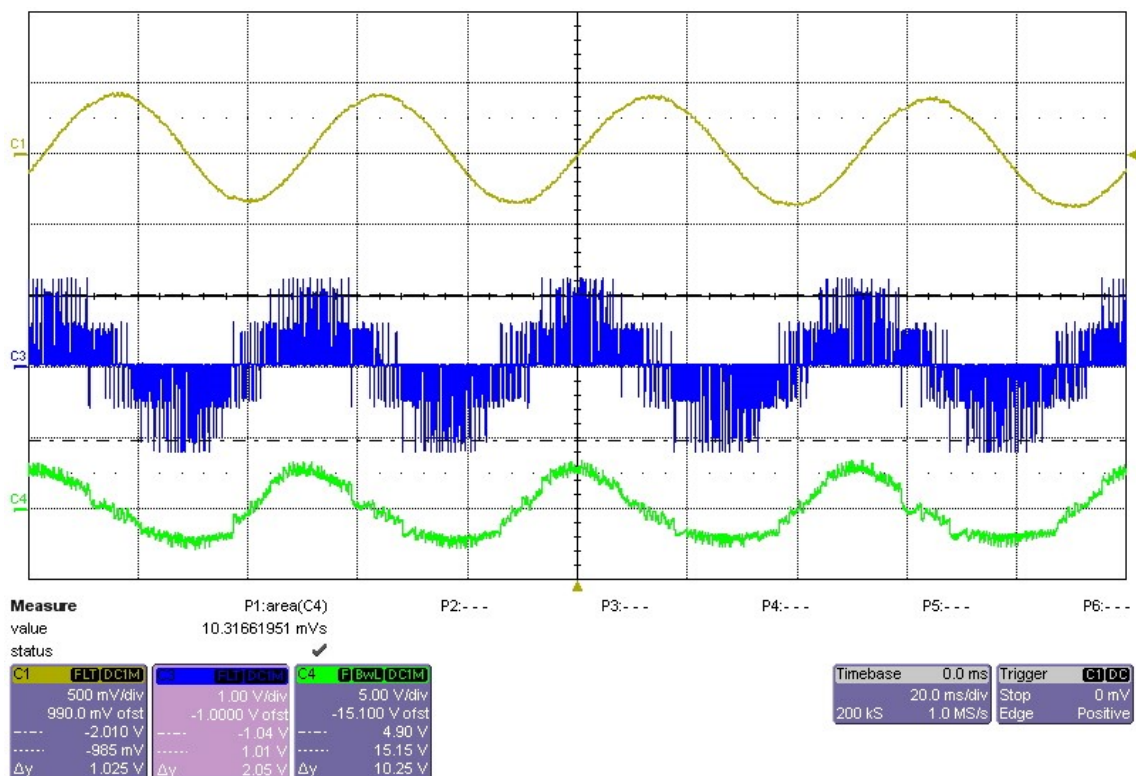
7.1 Veličiny v ustáleném stavu

Veličiny v ustáleném stavu jsou zobrazeny na Obr. 7.1 - Obr. 7.8. Všechny průběhy jsou měřené při žádané hodnotě momentu 5 Nm, žádaného jalového výkonu 0 VAR a při dostatečném zatížení, aby nedocházelo k poklesu momentu a deformaci průběhů.

Obr. 7.1-7.2 zachycuje průběh alfa složek statorového toku (1. kanál), vektoru statorového napětí (2. kanál) a statorového proudu (3. kanál) při vzorkovací frekvenci 5 kHz a 25 kHz. Hystereze jalového výkonu a momentu je nastavená na 0. Je patrné, že čím vyšší je vzorkovací frekvence, tím se průběh statorového proudu blíží sinusovému. To ovšem také vede k nárůstu spínacích ztrát.

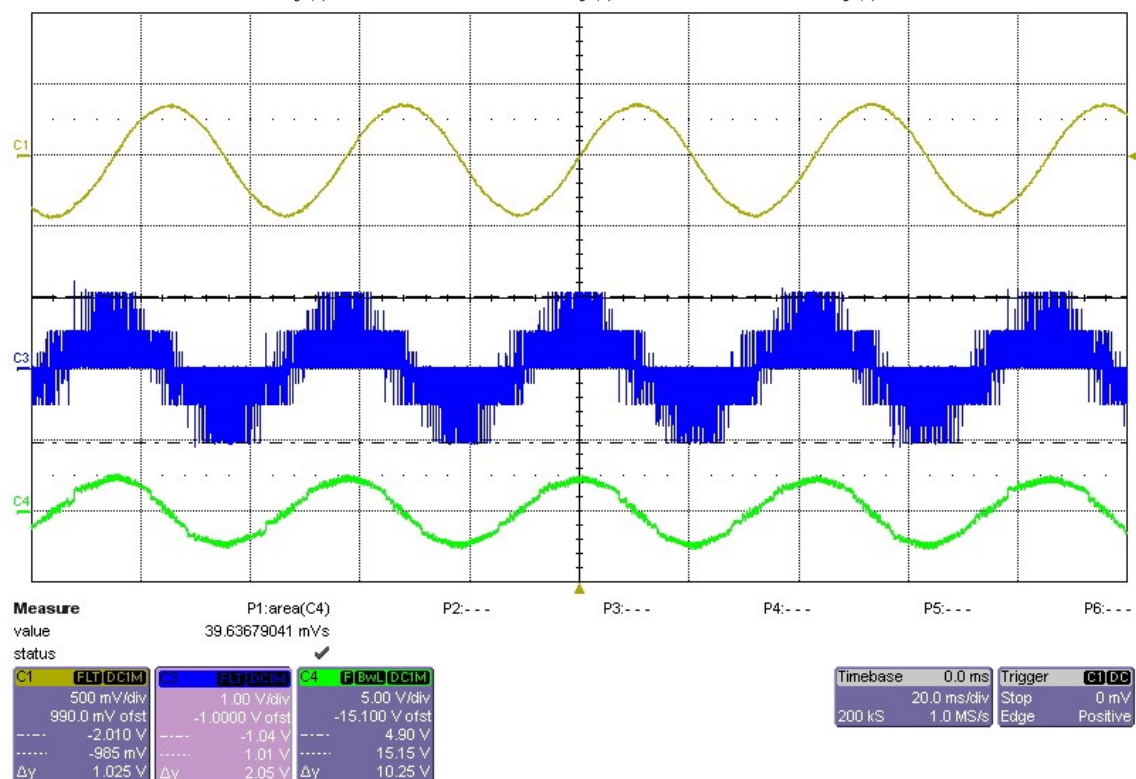
Obr. 7.3-7.4 ukazuje průběh žádané a skutečné hodnoty jalového výkonu a momentu při vzorkovací frekvenci 25 kHz a pro různě nastavené hodnoty hysterezních regulátorů. Je zde vidět, že skutečné hodnoty jalového výkonu a momentu kmitají v požadovaném hysterezním pásmu kolem žádaných hodnot. Na Obr. 7.5 jsou stejné průběhy se sníženou vzorkovací frekvencí. Je patrné, že při nižší frekvenci je rozkmit skutečných hodnot větší.

Obr. 7.6 zobrazuje trajektorii koncového bodu statorového magnetického toku pohybující se po kružnici.



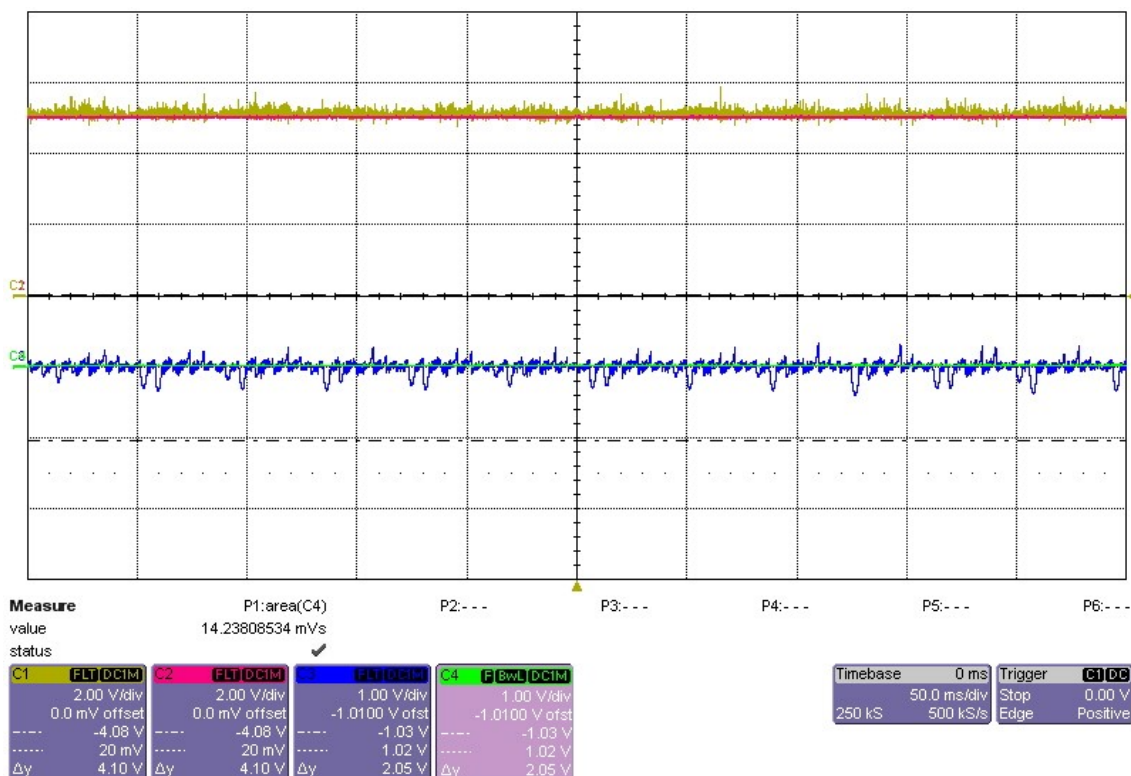
Obr. 7.1 Veličiny motoru v ustáleném stavu ($m^* = 5 \text{ Nm}$, $q^* = 0 \text{ VAr}$, $f_{vz} = 10 \text{ kHz}$).

C1 $\Psi_{1\alpha} = f(t)$, 0,5 Wb/d; C3 $u_{1\alpha} = f(t)$, 100 V/d; C4 $i_{1\alpha} = f(t)$, 5 A/d



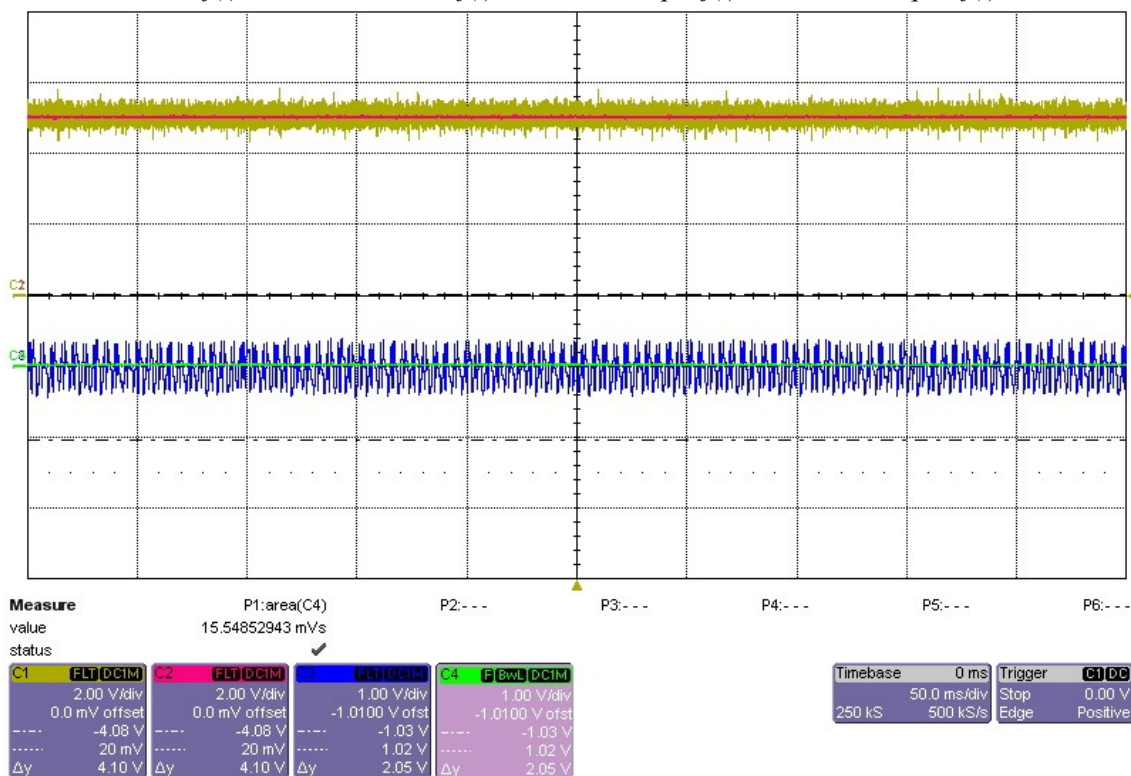
Obr. 7.2 Veličiny motoru v ustáleném stavu ($m^* = 5 \text{ Nm}$, $q^* = 0 \text{ VAr}$, $f_{vz} = 25 \text{ kHz}$).

C1 $\Psi_{1\alpha} = f(t)$, 0,5 Wb/d; C3 $u_{1\alpha} = f(t)$, 100 V/d; C4 $i_{1\alpha} = f(t)$, 5 A/d



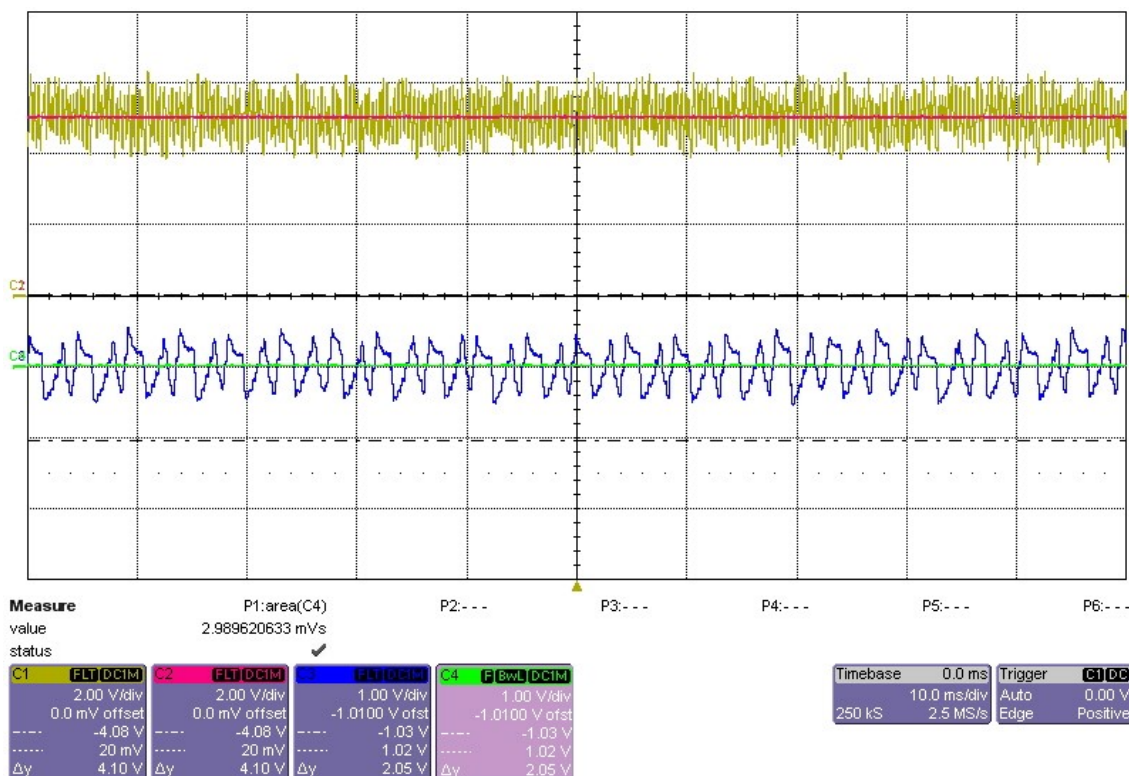
Obr. 7.3 Veličiny motoru v ustáleném stavu ($HM = 0 \text{ Nm}$, $HQ = 0 \text{ VAr}$, $f_{vz} = 25 \text{ kHz}$).

$C1 \ m = f(t)$, 2 Nm/d ; $C2 \ m^* = f(t)$, 2 Nm/d ; $C3 \ q = f(t)$, 1 VAr/d ; $C4 \ q^* = f(t)$, 1 VAr/d



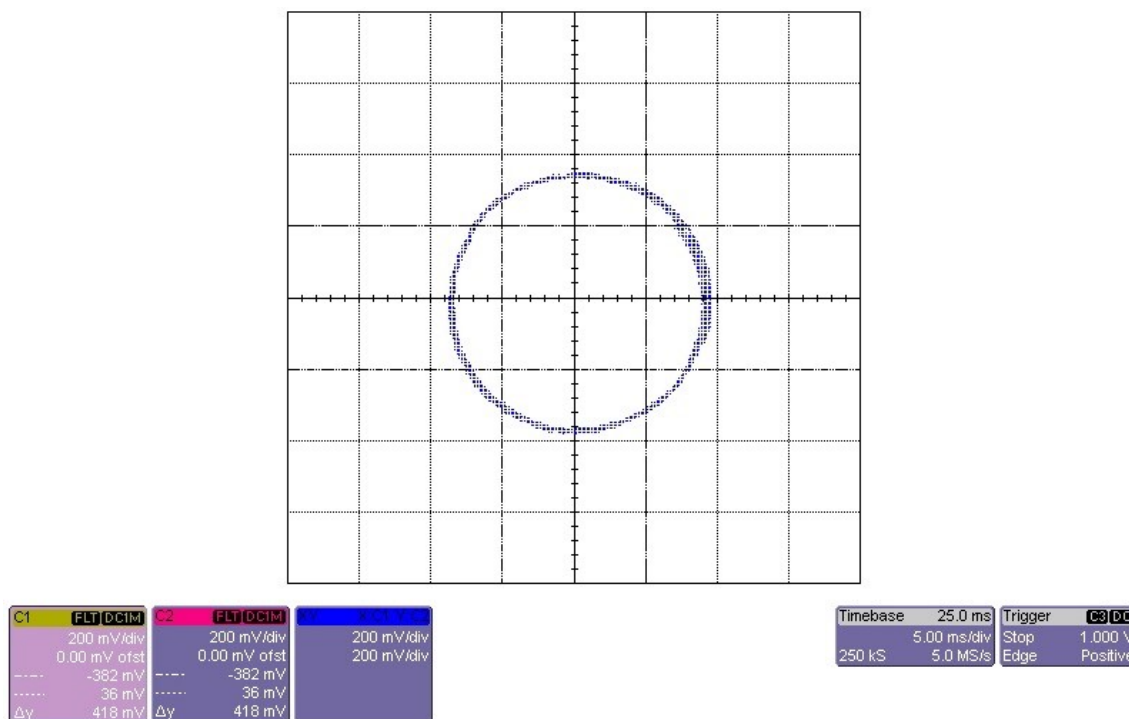
Obr. 7.4 Veličiny motoru v ustáleném stavu ($HM = 0,3 \text{ Nm}$, $HQ = 0,3 \text{ VAr}$, $f_{vz} = 25 \text{ kHz}$).

$C1 \ m = f(t)$, 2 Nm/d ; $C2 \ m^* = f(t)$, 2 Nm/d ; $C3 \ q = f(t)$, 1 VAr/d ; $C4 \ q^* = f(t)$, 1 VAr/d



Obr. 7.5 Veličiny motoru v ustáleném stavu ($HM = 0,3 \text{ Nm}$, $HQ = 0,3 \text{ VAr}$, $f_{vz} = 10 \text{ kHz}$).

$C1 \text{ } m = f(t)$, 2 Nm/d ; $C2 \text{ } m^* = f(t)$, 2 Nm/d ; $C3 \text{ } q = f(t)$, 1 VAr/d ; $C4 \text{ } q^* = f(t)$, 1 VAr/d



Obr. 7.6 Trajektorie koncového bodu statorového magnetického toku v ustáleném stavu ($f_{vz} = 25 \text{ kHz}$).

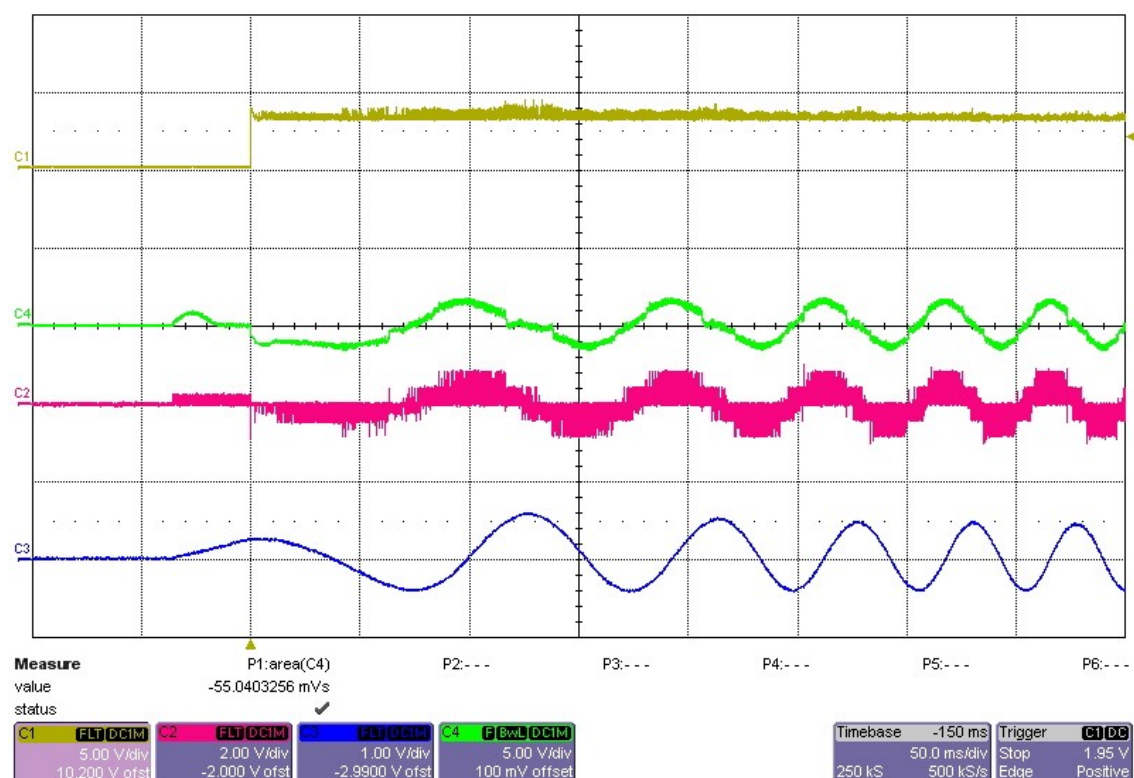
$C1 \text{ } \Psi_{1\alpha} 0,2 \text{ Wb/d}$; $C2 \text{ } \Psi_{1\beta} 0,2 \text{ Wb/d}$

7.2 Veličiny při rozběhu

Na Obr. 7.7 jsou zobrazené alfa složky vektoru statorového napětí (2. kanál), statorového magnetického toku (3. kanál), statorového proudu (4. kanál) a průběh žádaného momentu (1. kanál) při rozběhu motoru v kladném směru otáčení. Zadaná hodnota žádaného momentu byla 3 Nm, požadovaného jalového výkonu 0 VAR a velikost obou hysterezních regulátorů 0.

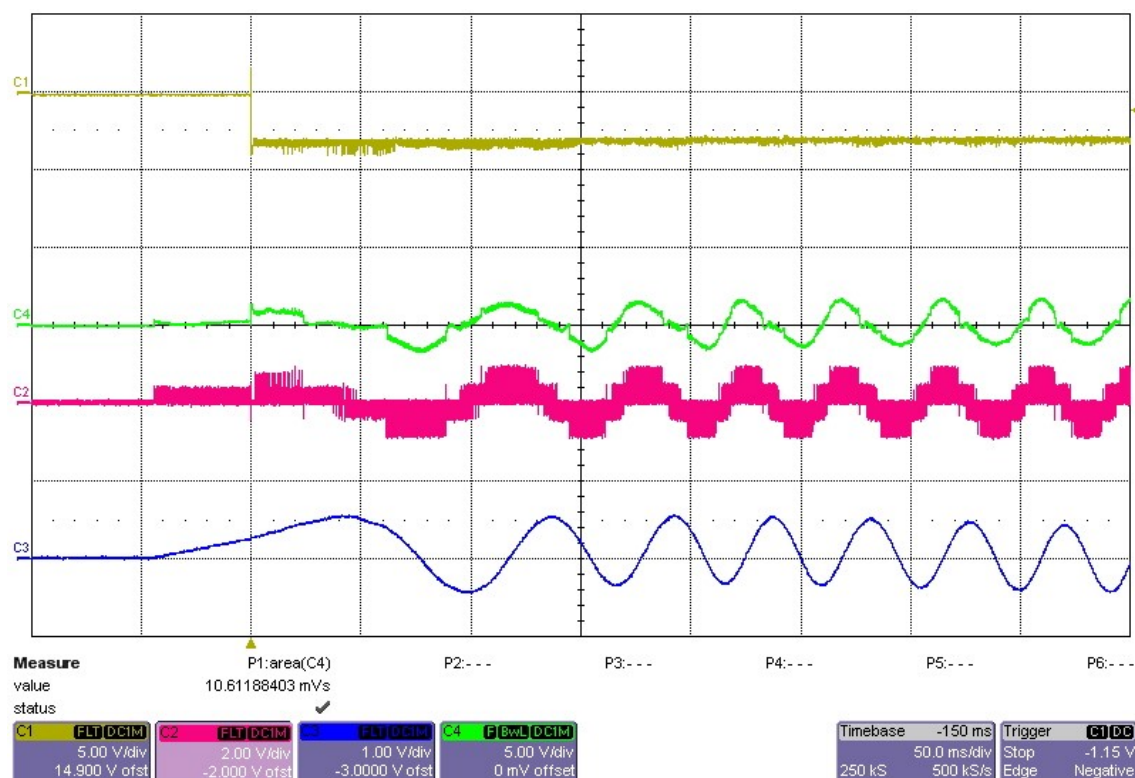
Z průběhu jde vidět, že na začátku probíhá proces nabuzení motoru přibližně 35 ms, při kterém se přepíná mezi jedním z aktivních vektorů a nulovým vektorem. Poté se teprve spouští algoritmus řízení přímé metody momentu.

Obr. 7.8 ukazuje stejné průběhy při rozběhu motoru v záporném směru s žádanou hodnotou momentu -3 Nm.



Obr. 7.7 Veličiny motoru při rozběhu v kladném směru ($m^* = 3 \text{ Nm}$, $f_{VZ} = 25 \text{ kHz}$).

$C1 \ m = f(t)$, 5 Nm/d; $C2 \ u_{1\alpha} = f(t)$, 200 V/d; $C3 \ \Psi_{1\alpha} = f(t)$, 1 Wb/d; $C4 \ i_{1\alpha} = f(t)$, 5 A/d



Obr. 7.7 Veličiny motoru při rozběhu v záporném směru ($m^* = -3 \text{ Nm}$, $f_{vz} = 25 \text{ kHz}$).
C1 $m = f(t)$, 5 Nm/d ; **C2** $u_{1\alpha} = f(t)$, 200 V/d ; **C3** $\Psi_{1\alpha} = f(t)$, 1 Wb/d ; **C4** $i_{1\alpha} = f(t)$, 5 A/d

8. ZÁVĚR

V úvodu této práce byl proveden rozbor problematiky přímého řízení momentu synchronního motoru s permanentními magnety a detailní popis vybrané regulační struktury. Tato metoda byla implementována do řídicího systému s digitálním signálovým procesorem TMS320F28335 s frekvencí jádra 150 MHz, který je vhodný pro dynamicky náročné aplikace. Tento procesor je také vybaven řadou periférií, které usnadnily celkový návrh vytvořeného algoritmu.

Návrh algoritmu DTC byl psán v jazyce C v programu Code Composer Studio, který je určen pro procesory od firmy Texas Instruments. Při jeho tvorbě byly postupně vytvářeny jednotlivé bloky regulační struktury dle kapitoly 3. Byl přitom také kladen důraz na snadnou orientaci a přehlednost.

Testování a vyladování algoritmu probíhalo v laboratoři elektrických regulovaných pohonů - E103 na VŠB. Použitý synchronní motor s permanentními magnety měl označení *1FK7063-5AF7* jehož parametry jsou popsány v kapitole 5.

Součástí práce bylo také vytvořit uživatelské rozhraní v programu LabVIEW pro snadné měření a zadávání vstupních proměnných do regulační struktury. K tomuto účelu byly navrženy dva grafické objekty. První představuje ovládací panel, na kterém lze zadávat a měnit vstupní parametry. Také zde lze měnit výběr veličin pro DA převodník. Druhý představuje měřicí přístroj, který sleduje okamžité hodnoty veličin v regulační struktuře.

V poslední části probíhalo experimentální měření pro ověření algoritmů DTC. Průběhy měřených veličin jsou zobrazeny v kapitole 7. Výsledky ukazují správnou funkčnost algoritmů v ustáleném stavu a při rozběhu motoru. Z časových důvodů bohužel nebyl zcela vyřešen problém s ošetřením momentového překmitu během reverzace motoru. Proto algoritmy nefungují zcela optimálně v přechodových dějích při vyšším momentovém zatížení.

Dalším zlepšením této práce by mohlo být doplnění algoritmů DTC o regulátor otáček.

Literatura

- [1] KOBERLE, P. a J. PAVELKA. Elektrické pohony a jejich řízení. 3. přepracované vydání. Praha: CVUT Praha, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [2] NEBORÁK I., Mechatronické systémy pro kombinované a distanční studium. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009.
- [3] BRANDŠTETTER, P. Elektrické regulované pohony III: Učební texty pro kombinované a distanční studium. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012.
- [4] ŻELECHOWSKI M. Space Vector Modulated Direct Torque Controlled (DTC – SVM) Inverter Fed Induction Motor Drive. Warsaw, 2005. Dizertační práce. Warsaw University of Technology. Vedoucí práce: P. Kaźmierkowski.
- [5] CHAMRÁD, P. Vektorové řízení synchronního motoru s permanentními magnety. Ostrava, 2015. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce: M. Kuchař.
- [6] GELNAR, L. Laboratorní stanoviště se střídavými regulovanými pohony. Ostrava, 2015. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce: M. Kuchař.
- [7] TMS320F28335 Delfino Microcontroller. Texas Instruments [online]. 2017 [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/tms320f28335>.
- [8] Code Composer Studio Integrated Development Environment. Texas Instruments [online]. 2016 [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>.
- [9] GSG:Debugging projects v5. Texas Instruments Wiki [online]. 2010 [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: http://processors.wiki.ti.com/index.php/GSG:Debugging_projects_v5.
- [10] LEM, Voltage Transducer LV 25-600/SP2, Data Sheet [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: http://www.lem.com/docs/products/lv_25-600.pdf.
- [11] LEM, Current Transducer LAH 25-NP, Data Sheet [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: http://www.lem.com/docs/products/lah_25-np.pdf.
- [12] SIMODRIVE 611, SIMOVERT MASTERDRIVES MC, 1FK7 Synchronous Motors. Siemens Online Support [online]. 2005 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/28683611/simodrive-611-simovort-masterdrives-mc-1fk7-synchronous-motors?dti=0&lc=en-WW>.

Seznam příloh

Příloha č. I.	Vytvořený program s algoritmy DTC-PMSM (Code Composer Studio v7)	CD-ROM
Příloha č. II.	Uživatelské rozhraní (LabVIEW)	CD-ROM